ISSN 2078-4481

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

2(93)

Частина 1

Рекомендовано до друку Вченою радою
Херсонського національного технічного університету
(протокол № 12 від 05.06.2025 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України
категорії «Б» зі спеціальностей: С1, D1, D2, D3, D5, D7, J3
(Наказ МОН України від 17.03.2020 № 409);
D4 (Наказ МОН України від 29.06.2021 № 735);
J5, J6, J7, J8, F2, F3, F5, F6, F7, G7, G8, G9, G11
(Наказ МОН України від 02.07.2020 № 886);
G1, G3, G4, G15 (Наказ МОН України від 24.09.2020 № 1188)

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв:
GoogleScholar, Crossref, National Library of Ukraine (Vernadsky)

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Редакційна колегія

Головний редактор
Литвиненко В. І.
д.т.н., професор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук,
заслужений діяч науки і техніки України

Заступник головного редактора
Сарібєкова Ю. Г.
д.т.н., професор

Шерстюк В. Г.
д.т.н., професор, проректор з навчальної роботи

Відповідальний секретар
Лур'є І. А.
к.т.н., доцент, начальник навчально-методичного відділу, доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук

Члени редакційної колегії

Баганов Є. О.	к.т.н., доцент
Березовський Ю. В.	д.т.н., доцент
Бойко Г. А.	к.т.н., доцент
Вороненко М. О.	к.т.н., доцент
Гончар О. І.	д.е.н., професор
Горбачов П. Ф.	д.т.н., професор
Дімітрова В.	д.н., доцент
Джерелюк Ю. О.	д.е.н., професор
Євтушенко В. В.	к.т.н., доцент
Жарікова М. В.	д.т.н., професор
Зубкова К. В.	к.т.н., доцент
Корчевська Л. О.	д.е.н., професор
Кузьміна Т. О.	д.т.н., професор
Куник О. М.	к.т.н., доцент
Луб'яний П. В.	к.т.н., доцент
Наумов О. Б.	д.е.н., професор
Олійник Н. М.	к.т.н., доцент
Плющ Р. М.	д.держ.упр., професор
Половцев О. В.	д.держ.упр., к.т.н., професор
Рудакова Г. В.	д.т.н., професор
Русанов С. А.	к.т.н., доцент
Савін С. Ю.	д.е.н., доцент
Салєба Л. В.	к.т.н., доцент
Семешко О. Я.	д.т.н., професор
Сідельникова Л. П.	д.е.н., професор
Smolarz A. (Польща)	dr.hab.inz.
Стоянова О. В.	к.т.н., доцент
Топалова Е. Х.	к.держ.упр., доцент
Філіппова В. Д.	д.держ.упр., професор
Хрущ Н. А.	д.е.н., професор
Чепелюк О. В.	д.т.н., професор
Шандова Н. В.	д.е.н., професор
Шарко О. В.	д.т.н., професор
Шарко М. В.	д.е.н., професор
Шевченко І. І.	д.т.н., професор

ISSN 2078-4481

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

VISNYK

OF KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

2(93)

Part 1

Recommended for publication by the Academic Council
of Kherson National Technical University
(Minutes № 12 on 5th June 2025)

The journal is included in the List of Scientific Professional Editions of Ukraine Category “B”
in specialties: C1, D1, D2, D3, D5, D7, J3
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 17.03.2020, № 409);
D4 (Ukraine Education and Science Ministry Order dated 29.06.2021, № 735);
J5, J6, J7, J8, F2, F3, F5, F6, F7, G7, G8, G9, G11
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 02.07.2020, № 886);
G1, G3, G4, G15
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 24.09.2020, № 1188)
The journal is included in the scientometric bases, electronic libraries and repositories:
Google Scholar, Crossref, National Library of Ukraine (Vernadsky)

Publishing House
“Helvetica”
2025

Editorial Board

Editor-in-Chief
Litvinenko V. I.
Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department of Informatics and Computer Science, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine

Deputy Editor-in-Chief
Saribekova Yu. G.
Doctor of Engineering Science, Professor

Sherstiuk V. H.
DSc (Engineering), Professor, Vice-Rector for Academic Affairs

Executive Secretary
Lurie I. Yu.
PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Educational and Methodical Department, Associate Professor of the Department of Informatics and Computer Sciences

Members of Editorial Board

Baganov Ye. O.	Ph.D., Associate Professor
Berezovsky Yu. V.	Doctor of Engineering Science, Associate Professor
Boiko H. A.	Ph.D., Associate Professor
Voronenko M. O.	Ph.D., Associate Professor
Honchar O. I.	Doctor of Economic Sciences, Professor
Horbachov P. F.	Doctor of Economics, Professor
Dimitrova V. Ya. (Bulgaria)	Ph.D., Associate Professor
Dzhereliuk Yu. A.	Doctor of Economics, Professor
Yevtushenko V. V.	Ph.D., Associate Professor
Zharikova M. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Zubkova K. V.	Ph.D., Associate Professor
Korchevska L. A.	Doctor of Economics, Professor
Kuzmina T. O.	Doctor of Technical Sciences, Professor
Kunyk O. N.	Ph.D., Associate Professor
Lubianyi P. V.	Ph.D., Associate Professor
Naumov O. B.	Doctor of Economics, Professor
Oliinyk N. M.	Ph.D., Associate Professor
Pliushch R. M.	Doctor of Sciences in Public Administration, Professor
Polovtsev O. V.	Doctor of Sciences in Public Administration, Professor
Rudakova H. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Rusanov S. A.	Ph.D., Associate Professor
Savin S. Yu.	Doctor of Economics, Associate Professor
Saleba L. V.	Ph.D., Associate Professor
Semeshko O. Ya.	Doctor of Engineering Science, Professor
Sidelnykova L. P.	Doctor of Economics, Professor
Smolarz A. (Poland)	Ph.D., Associate Professor
Stoianova O. V.	Ph.D., Associate Professor
Topalova E. K.	Ph.D., Associate Professor
Filippova V. D.	Doctor of Science in Public Administration, Professor
Khrushch N. A.	Doctor of Economics, Professor
Chepeliuk O. V.	Doctor of Technical Sciences, Professor
Shandova N. V.	Doctor of Economics, Professor
Sharko M. V.	Doctor of Economics, Professor
Sharko O. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Shevchenko I. I.	Doctor of Technical Sciences, Professor

ЗМІСТ

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

М. С. Андреєв, Г. С. Столяренко
Синтез біопалива на основі тригліцеридів рослинного походження з використанням метилового та етилового спиртів……11

А. В. Антонець, О. М. Іванов, С. В. Кучеренко, Б. М. Ярошенко
Дослідження контрольваного руху зерна по трьом регульованим полицям каскадної установки……18

В. С. Волошин, В. А. Бурко
Термодинамічний підхід та використання резонансної енергії для мінімізації відходів у харчовій промисловості……25

Н. О. Горохівський, В. М. Власовець
Аналіз сучасних підходів до забезпечення якості обробки складнопрофільних деталей у роботизованих виробничих системах……32

А. Г. Данилкович, О. А. Охмат
Хромощадне дублення шкіряного напівфабрикату для виготовлення еластичної шкіри……41

А. О. Деркаченко, О. В. Поливода
Автоматизована система діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів з використанням сферичного паралельного механізму……48

Д. О. Дмитрієв, М. Ф. Кузмічов
Вплив постобробки на якість деталей в адитивному виробництві……56

Н. Л. Дон, І. Ф. Погребняк
Моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції для автомобільної стоянки……62

В. О. Зубенко, Р. В. Телюта
Система захисту та моніторингу асинхронного двигуна з функцією аварійного відключення……67

О. В. Канівець, В. В. Дудник, І. М. Канівець, Н. М. Опара, Ю. В. Шкляр
Обґрунтування математичної моделі поверхневого зміцнення шляхом обкатки циліндричних поверхонь……73

О. В. Канівець, І. М. Канівець, О. У. Дрожчана, Н. М. Опара, В. В. Дудник
Безпека життєдіяльності в аграрному секторі: реалізація математичної моделі машинного зору для виявлення пожеж на полях……80

О. В. Кириллова, В. Л. Ромах
Трансформація ринку глобальних операторів контейнерних терміналів у контексті інтернаціоналізації, регіоналізації та цифрової адаптації……88

Є. В. Корбут, В. С. Парненко, О. А. Плівак, Т. П. Ніколаєнко
Визначення розмірів дискретних ділянок покриття інструменту для обробки полімерних композитів……102

В. В. Курак, О. В. Андронова, Є. О. Баганов, І. Ф. Погребняк
Система зовнішнього освітлення з пріоритетним живленням від джерела постійної напруги……111

М. С. Кучук, О. Р. Бєлянська, О. В. Кравченко, О. І. Онопрієнко, Л. В. Ващенко
Дослідження технології очищення забарвлених розчинів при активуванні диспергуванням кисень-водневих процесів із наступною адсорбцією……117

О. М. Лебедь
Оцінка якості роботи напівпровідникового перетворювача частоти суднового електротехнічного комплексу на базі нечіткої логіки……125

О. М. Лебедь, Н. І. Лебедь
Керування параметрами хитавиці судна на основі активних цистерн з використанням математичного апарату нечіткої логіки……131

В. О. Лукаш
Порівняльний аналіз традиційних і сучасних способів сушіння зерна: класифікація та перспективи розвитку……137

А. В. Макатьора, Д. А. Макатьора, М. А. Зенкін, В. О. Кохановський, А. І. Карпешко
Функціонально-конструктивний вплив ножа з рифлями на процес повздовжнього різання монолітної гуми……142

О. М. Мельник, О. А. Онищенко, С. В. Курдюк, О. М. Маслій, В. В. Очеретна
Комплексне моделювання впливу багатофазного зміцнення на зносостійкість та корозійну стійкість конструкційних сталей у морському середовищі……149
O. M. Melnyk, M. P. Bulgakov, V. Yu. Kucherenko
State and dynamics of environmental impact from shipping in the Black Sea region: trends, challenges, and technological responses……156
М. М. Неня
Оптимізація конфігурацій тепловиділяючих збірок у ВВЕР-1000 з урахуванням пошкоджень оболонок паливних елементів……163
М. Б. Нестеренко
Використання піску та вапняку як функціональних наповнювачів у модифікованих цементних в'яжучих сумішах……171
І. Ф. Погребняк, Н. Л. Дон, А. В. Любезний
Визначення доцільності впровадження мережевої фотоелектричної станції дахового типу для першого корпусу ХНТУ……177
В. Е. Приходько
Знаходження інтегрального індексу енергетичної і транспортної ефективності функціонування автопоїздів для міжнародних перевезень……185
В. О. Проценко
Перспективи удосконалення пасажирського сполучення в місті Херсоні застосуванням тролейбусів з автономним ходом……191
O. V. Radionov, N. V. Tarelnyk, S. V. Pavlovskyi
Magnetic fluid seals for bearing assemblies of mine main ventilation fans……202
М. О. Рибальченко, О. Ю. Потап, М. В. Михайловський, О. П. Єгоров, В. І. Шибакінський
Використання програмного засобу Stateflow для моделювання складних систем в металургії……210
О. Ю. Савойський, В. М. Козін, В. Ф. Сіренко, Т. С. Вольвач, Ю. В. Сіренко, О. В. Рясна
Аналіз причин відключення високовольтних ліній електропередачі в електромережах Сумської області……221
Ю. В. Сіренко, Т. С. Вольвач, О. Ю. Савойський, В. М. Козін
Аналіз стану енергетичної системи України та заходи щодо покращення ситуації……229
Ю. Є. Скнар, І. В. Скнар, Р. С. Аміруллоєв, Т. Є. Бутиріна, Д. О. Кожура
Синтез композитних фотокаталітичних плівок Cu-TiO_2……238
V. P. Slavych
Transport system management model in the conditions of a reduction in the number of passengers or carriers……248
І. М. Соловей, Р. М. Тріщ, Е. А. Хом'як, В. М. Бурдейна, О. М. Косиченко, А. О. Бояркін
Вплив електростатичного водовідштовхувального покриття лопатей повітряного гвинта на енергоефективність і аеродинамічні характеристики……252
О. В. Степанов
Системи автоматичного зниження нерівномірності гальмівних моментів на колесах однієї вісі автомобіля……264
О. В. Степанов, Т. В. Волобуєва
Інтегральний бракувальний параметр мастильної оливи для вантажного автотранспорту……273
В. І. Холденко
Аналіз існуючих методів діагностики суднових насосів……280

ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

О. В. Благодир, Т. А. Надопта
Аналіз систем та методів розкрою рулонних матеріалів для легкої промисловості……287
С. М. Коб'яков
Аналіз експериментальних досліджень з виробництва текстильної сировини……294
Ю. О. Максимченко, Г. А. Бойко, Є. О. Случинський, А. В. Євтушенко
Аналіз методів з оцінки якості конопляної трести……300

УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

І. Б. Азарова, Т. М. Безверхнюк, О. В. Яценко
Соціальний аналіз витрат і вигід як інструмент стратегічного оцінювання освітніх ініціатив в Україні……307
А. І. Пляскіна
Дослідження бізнес-середовища компаній на основі інновацій (зелена логістика)……312
Д. В. Ревенець
Сегментація регіонального ринку ІТ-послуг: маркетинговий аналіз та інструменти впливу……317
С. В. Стуканов
Теоретичні засади формування системи «зелених» державних закупівель в Україні……324
О. В. Телюк
Удосконалення механізмів реалізації державної регіональної політики на основі цифровізації……331
Д. В. Ярмусь
Ризик-менеджмент в умовах воєнного стану: адаптація моделей управління……337

ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

В. В. Базиченко
Загрози та виклики державному управлінню в сфері національної безпеки України в умовах глобальних та регіональних викликів……344
О. О. Білик
Автоматизовані робочі місця працівників сфери управління як технічний супровід процесів у державному управлінні……349
О. В. Єфанов
Нормативно-правове регулювання у сфері публічного управління процесами формування зони вільної торгівлі між Україною та ЄС……357
Г. І. Казаков
Розвиток музичної індустрії Австралії в контексті реалізації програми Revive……362
O. M. Oliinyk
Assessment of the current state of government regulation of digital transformation in regional development the food industry in Ukraine……369
В. Д. Філіппова, І. П. Лопушинський, В. І. Клюцевський
Реформування територіальної організації виконавчої влади в Україні: нові законодавчі ініціативи……378

CONTENTS

ENGINEERING SCIENCES

M. S. Andreiev, G. S. Stolyarenko
Synthesis of biofuel from plant-based triglycerides using methanol and ethanol……11
A. V. Antonets, O. M. Ivanov, S. V. Kucherenko, B. M. Yaroshenko
The research of controlled grain movement on three adjustable shelves of a cascade installation……18
V. S. Voloshin, V. A. Burko
Thermodynamic approach and use of resonant energy for waste minimization in the food industry……25
N. O. Horokhivskyi, V. M. Vlasovets
Analysis of modern approaches to quality assurance of complex parts in robotic production systems……32
A. H. Danylkovych, O. A. Okhmat
Chromium-saving tanning of leather semi-finished product for elastic leather manufacturing……41
A. O. Derkachenko, O. V. Polyvoda
Automated system for diagnosing internal surfaces of industrial autoclaves using a spherical parallel mechanism……48
D. O. Dmytriiev, M. F. Kuzmichov
Nfluence of post-making on the quality of parts in additive manufacturing……56
N. L. Don, I. F. Pogrebniak
Modeling the operation of a grid photoelectric station for a car park……62
V. O. Zubenko, R. V. Teliuta
Protection and monitoring system for an induction motor with emergency shutdown function……67
O. V. Kanivets, V. V. Dudnyk, I. M. Kanivets, N. M. Opara, Yu. V. Shklyar
Substantiation of the mathematical model of surface hardening by running-in of cylindrical surfaces……73
O. V. Kanivets, I. M. Kanivets, O. U. Drozhchana, N. M. Opara, V. V. Dudnyk
Life safety in the agricultural sector: implementation of a mathematical model of machine vision for detecting fires in the fields……80
O. V. Kyryllova, V. L. Romakh
Transformation of the global container terminal operators market in the context of internationalization, regionalization and digital adaptation……88
Ye. V. Korbut, V. S. Parnenko, O. A. Plivak, T. P. Nikolaienko
Determining the dimensions of discrete coating sections for tools used in polymer composite machining……102
V. V. Kurak, O. V. Andronova, Ye. A. Baganov, I. F. Pogrebniak
External lighting system with priority power supply from DC voltage source……111
M. S. Kuchuk, O. R. Byelyanska, O. V. Kravchenko, O. I. Onopriienko, L. V. Vashchenko
Study of the technology for colored solutions purification through dispersion-activated oxygen-hydrogen processes followed by adsorption……117
O. M. Lebed
Evaluation of the quality of the work of a semiconductor frequency converter of a ship electrical complex based on fuzzy logic……125
O. M. Lebed, N. I. Lebed
Control of ship rolling parameters based on active tanks using the mathematical apparatus of fuzzy logic……131
V. O. Lukash
Comparative analysis of traditional and modern methods of grain drying: classification and development prospects……137
A. V. Makatora, D. A. Makatora, M. A. Zenkin, V. O. Kokhanovskyi, A. I. Karpeshko
Functional and constructive influence of a knife with ribbons on the process of longitudinal cutting of monolithic rubber……142
O. M. Melnyk, O. A. Onishchenko, S. V. Kurdiuk, O. M. Maslii, V. V. Ocheretna
Comprehensive modeling of the effect of multiphase hardening on the wear and corrosion resistance of structural steels in marine environments……149
O. M. Melnyk, M. P. Bulgakov, V. Yu. Kucherenko
State and dynamics of environmental impact from shipping in the Black Sea region: trends, challenges, and technological responses……156

M. M. Nenia
Optimization of fuel assembly configurations in VVER-1000 reactors considering fuel rod cladding damage……163
M. B. Nesterenko
Use of sand and limestone as functional fillers in modified cement binders……171
I. F. Pogrebniak, N. L. Don, A. V. Liubeznyi
Determination of the feasibility of implementing a rooftop-type grid photoelectric station for the first building of the Kherson National Technical University……177
V. E. Prykhodko
Integral index evaluation of energy and transport efficiency in road trains for international freight transport……185
V. O. Protsenko
Prospects for improving passenger communication in the city of Kherson by using autonomous trolleybuses……191
O. V. Radionov, N. V. Tarelnyk, S. V. Pavlovskyi
Magnetic fluid seals for bearing assemblies of mine main ventilation fans……202
M. O. Rybalchenko, O. Yu. Potap, M. V. Mykhailovskyi, O. P. Yehorov, V. I. Shybakinskyi
Using the Stateflow software tool for modeling complex systems in metallurgy……210
O. Yu. Savoiskyi, V. M. Kozin, V. F. Sirenko, T. S. Volvach, Yu. V. Sirenko, O. V. Ryasnaya
Analysis of high-voltage power transmission line outages in the electrical networks of Sumy region……221
Yu. V. Sirenko, T. S. Volvach, O. Yu. Savoiskyi, V. M. Kozin
Analysis of the state of Ukraine's energy system and measures to improve the situation……229
Yu. E. Sknar, I. V. Sknar, R. S. Amirulloev, T. E. Butyrina, D. O. Kozhura
Synthesis of Cu-TiO_2 composite photocatalytic films……238
V. P. Slavych
Transport system management model in the conditions of a reduction in the number of passengers or carriers……248
I. M. Solovey, R. M. Trishch, E. A. Khomiak, V. M. Burdeina, O. M. Kosychenko, A. O. Boyarkin
Influence of electrostatic water-repellent coating of propeller blades on energy efficiency and aerodynamic characteristics……252
O. V. Stepanov
System of automatic reduction of uneven braking torques on the wheels of one vehicle axle……264
O. V. Stepanov, T. V. Volobuyeva
Integral rejection of lubricating oil for freight vehicles……273
V. I. Kholdenko
Analysis of existing methods for diagnostic of ship pumps……280

THE TECHNOLOGY OF LIGHT AND FOOD INDUSTRY

O. V. Blahodyr, T. A. Nadopta
Analysis of systems and methods for cutting rolled materials in the light industry……287
S. M. Kobyakov
Analysis of experimental research on textile raw material production……294
Yu. O. Maksymchenko, H. A. Boiko, E. O. Sluchynsky, A. V. Evtushenko
Analysis of methods for assessing the quality of hemp trust……300

MANAGEMENT AND ADMINISTRATION

I. B. Azarova, T. M. Bezverkhniuk, O. V. Yatsenko
Social cost-benefit analysis as a strategic assessment tool for educational initiatives in Ukraine……307
A. I. Plyaskina
Research of the business environment of companies based on innovations (green logistics)……312
D. V. Revenec
Regional market segmentation of IT services: marketing analysis and influence tools……317
S. V. Stukanov
Theoretical principles of forming a system of "green" public procurement in Ukraine……324

O. V. Teliuk
Improvement of mechanisms for implementing state regional policy on the basis of digitalization..... 331
D. V. Yarmus
Risk management in martial arts conditions: adaptation of management models..... 337

PUBLIC MANAGEMENT AND ADMINISTRATION

V. V. Bazychenko
Threats and challenges to public administration in the field of national security of Ukraine in the context of global and regional challenges..... 344
O. O. Bilyk
Automatized workplaces of administrative employees as technical support of processes in public administration..... 349
O. V. Yefafov
Regulatory and legal regulation in the sphere of public administration of the processes of formation of the free trade area between Ukraine and the EU..... 357
H. I. Kazakov
Development of the Australian music industry in the context of the implementation of the Revive program..... 362
O. M. Oliinyk
Assessment of the current state of government regulation of digital transformation in regional development the food industry in Ukraine..... 369
V. D. Filippova, I. P. Lopushynskyi, V. I. Klyutsevsky
Reforming the territorial organization of the executive authority in Ukraine: new legislative initiatives..... 378

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 66.095.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.1

М. С. АНДРЕЄВ
аспірант кафедри хімічних технологій та водоочищення
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0000-0002-3175-9349

Г. С. СТОЛЯРЕНКО
доктор технічних наук,
професор кафедри хімічних технологій та водоочищення
Черкаський державний технологічний університет
ORCID: 0000-0001-5287-3733

СИНТЕЗ БІОПАЛИВА НА ОСНОВІ ТРИГЛІЦЕРИДІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТИЛОВОГО ТА ЕТИЛОВОГО СПИРТІВ

Сучасні дослідження в галузі альтернативної енергетики зосереджені на розробці ефективних методів отримання біопалива з відновлюваної сировини. У даній роботі представлено комплексний аналіз процесу переестерифікації тригліцеридів соняшникової, ріпакової та соєвої олій з використанням метилового та етилового спиртів. Метою дослідження є оптимізація технологічних параметрів синтезу для підвищення виходу та якості кінцевого продукту. Процес переестерифікації досліджувався за різних температурних режимів (60–65 °С для метанолу, 75–78 °С для етанолу) при молярному співвідношенні спирт : олія 6:1. В якості каталізаторів застосовувалися гомогенні (KOH, NaOH) *та гетерогенні* (CaO, MgO) *системи з концентрацією 0,8–1,0 % від маси сировини. Тривалість реакції становила 60–90 хв, а її перебіг контролювався методами газової хроматографії та ЯМР-спектроскопії. Експериментально встановлено, що використання метанолу забезпечує вищий вихід біопалива (95–97 %) порівняно з етанолом (90–92 %). Однак етилові естери демонструють кращі низькотемпературні характеристики, що робить їх перспективними для використання в холодному кліматі. Найвищу активність серед каталізаторів показав КОН, тоді як гетерогенні системи потребували більш тривалого часу реакції. На підставі отриманих даних розроблено технологічну схему, яка включає етапи очищення сировини, переестерифікації, сепарації гліцеринової фази та дистиляції естерів. Запропоновано методи рекуперації побічних продуктів, що дозволяє знизити собівартість процесу на 15–20 %. Особливу увагу приділено використанню біоетанолу, що забезпечує створення повністю відновлюваного палива. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої методики для виробництва біопалива другого покоління. Перспективними напрямами подальших досліджень є: оптимізація гетерогенного каталізу, застосування мікробних ліпаз та комплексне використання нехарчової олійної сировини. Впровадження таких технологій сприятиме розвитку низьковуглецевої енергетики та зменшенню залежності транспортного сектору від нафтопродуктів.*

Ключові слова: *біодизель, переестерифікація, альтернативні палива, каталітичні системи, відновлювана енергетика.*

M. S. ANDREIEV
Postgraduate Student at the Department of Chemical Technologies
and Water Treatment
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0000-0002-3175-9349

G. S. STOLYARENKO
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Chemical Technologies and Water Treatment
Cherkasy State Technological University
ORCID: 0000-0001-5287-3733

SYNTHESIS OF BIOFUEL FROM PLANT-BASED TRIGLYCERIDES USING METHANOL AND ETHANOL

Modern research in alternative energy focuses on developing efficient methods for producing biofuel from renewable feedstocks. This study presents a comprehensive analysis of the transesterification process of sunflower, rapeseed, and soybean triglycerides using methanol and ethanol. The research aims to optimize synthesis parameters to enhance yield and product quality. The transesterification process was investigated under varying temperature conditions (60–65 °C for methanol, 75–78 °C for ethanol) at a molar alcohol-to-oil ratio of 6:1. Homogeneous (KOH, NaOH) *and heterogeneous* (CaO, MgO) *catalysts were used at concentrations of 0.8–1.0 % by weight of feedstock. The reaction duration was 60–90 min, monitored using gas chromatography and NMR spectroscopy. Experimental results showed that methanol ensured higher biofuel yield (95–97 %) compared to ethanol (90–92 %). However, ethyl esters exhibited superior low-temperature properties, making them more suitable for cold climates. Among catalysts, KOH demonstrated the highest activity, while heterogeneous systems required longer reaction times. A technological scheme was developed, comprising feedstock purification, transesterification, glycerol phase separation, and ester distillation. Proposed byproduct recovery methods reduced production costs by 15–20 %. Special emphasis was placed on bioethanol use, enabling fully renewable fuel production. The results confirm the efficiency of the proposed method for second-generation biofuel production. Future research directions include optimizing heterogeneous catalysis, applying microbial lipases, and utilizing non-edible oil feedstocks. Implementing such technologies will advance low-carbon energy and reduce the transportation sector's dependence on petroleum products.*

Key words: *biodiesel, transesterification, alternative fuels, catalytic systems, renewable energy.*

Постановка проблеми

Дослідження синтезу біопалива на основі тригліцеридів рослинного походження з використанням метилового та етилового спиртів характеризується високою актуальністю, що обумовлена низкою вагомих факторів:

В умовах нестабільності світових ринків енергоносіїв та обмеженості викопних ресурсів розробка технологій виробництва біопалива з відновлюваної сировини дозволяє країнам зменшити залежність від імпорту нафтопродуктів та диверсифікувати енергетичний баланс.

Використання біопалива суттєво знижує емісію парникових газів та шкідливих речовин у порівнянні з традиційними нафтопродуктами. Біодизель на основі рослинних олій характеризується зниженням викидів CO_2 на 60–80 %, практично повною відсутністю сполук сірки та зменшенням емісії твердих частинок.

Розвиток виробництва біопалива сприяє виконанню міжнародних зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів відповідно до Паризької угоди та досягненню цілей вуглецевої нейтральності.

Виробництво біопалива стимулює розвиток аграрного сектору економіки, створюючи додаткові ринки збуту для сільськогосподарської продукції та забезпечуючи повніше використання потенціалу земельних ресурсів.

Порівняльне дослідження використання метанолу та етанолу у синтезі біопалива відкриває перспективи для оптимізації виробничих процесів та покращення характеристик кінцевого продукту.

Розробка вдосконалених методів синтезу біопалива сприяє зниженню собівартості продукції та підвищенню її конкурентоспроможності порівняно з традиційними паливами.

Виробництво біопалива створює можливості для комплексної переробки відходів рослинництва, харчової промисловості та відпрацьованих олій, що відповідає принципам сталого розвитку та безвідходного виробництва.

В умовах поступової електрифікації легкового транспорту, біопаливо залишається одним з ключових рішень для декарбонізації вантажних перевезень, авіації та морського транспорту, де електрифікація технічно ускладнена.

Таким чином, експериментальне дослідження синтезу біопалива на основі рослинних тригліцеридів з різними типами спиртів є актуальним науково-практичним завданням, що сприяє вирішенню комплексу економічних, екологічних та соціальних проблем сучасності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останні роки тема синтезу біопалива з рослинних олій привернула значну увагу наукової спільноти, що відображається у великій кількості публікацій з різних аспектів цієї проблематики.

Команда дослідників *(Yusoff, Mohamad & Xu, Xuebing & Guo, Zheng. (2014))* році вивчала різні каталізатори для переестерифікації соняшникової олії. Їхні результати показали цікаву особливість – хоча гетерогенні каталізатори на основі оксидів лужноземельних металів можна використовувати багаторазово, вони все ж потребують більш суворих умов реакції порівняно з традиційними гомогенними каталізаторами [2].

(Столяренко Г. С., Орлов С. П., Фоміна Н. М., Ющенко С. Л. (2010)) глибоко дослідили, як різні умови реакції впливають на якість та вихід біодизеля. Вони з'ясували, що для метанолу найкраще працює температура 58–65 °С, а для етанолу – 75–80 °С. Також вони зробили практичне спостереження – якщо додати занадто багато каталізатора (понад 1,2 % мас.), утворюється емульсія, що суттєво ускладнює подальше розділення продуктів [1].

(Gotovuša, Jelena & Faraguna, Mia & Huzjak, Ivana & Zadravec, Paula & Zadravec, Martina & Vuković, Fabio. (2024)) розробили математичну модель, яка допомагає краще зрозуміти кінетику реакції з різними спиртами.

Їхня робота пояснює, чому реакція з етанолом відбувається на 15–20 % повільніше, ніж з метанолом – все через різницю в полярності та реакційній здатності цих спиртів [3].

Дослідження *(Isler, Asli & Karaosmanoğlu, Filiz. (2023))* показало, що можна значно прискорити процес синтезу біопалива, використовуючи ультразвукову або мікрохвильову обробку. Такий підхід не тільки скорочує час реакції майже на третину, але й допомагає заощадити енергію – що особливо важливо для промислового виробництва [4].

Вчені *(Ragupathy, Hariprasath & Venkatanagaraju, Erumalla. (2022))* запропонували нову технологічну схему з використанням проточних реакторів. Їхня інновація полягає в удосконаленій системі розділення та очищення продуктів, яка значно зменшує кількість стічних вод і енергетичні витрати [5].

Цікаву альтернативу запропонували *(Bacha, Abir & Alonazi, Mona & Alharbi, Mona & Horchani, Habib & Abdelmalek, Imen. (2022))* – вони розробили метод отримання біодизеля з використанням надкритичного метанолу без каталізаторів. Цей підхід елегантно вирішує проблему видалення каталізатора після реакції, але вимагає спеціального обладнання для роботи при високому тиску [8].

(Bimestre TA, Júnior JAM, Tuna CE, Botura CA, Canettieri E(2020)) зосередився на «зеленому» підході до синтезу біопалива, використовуючи ферментативні каталізатори на основі іммобілізованих ліпаз. Їхній метод дозволяє проводити реакцію при значно нижчих температурах (30–40 °C) і забезпечує високу селективність, хоча вартість таких каталізаторів залишається викликом для широкого впровадження [11].

Як бачимо, останні дослідження охоплюють широкий спектр питань – від пошуку оптимальних умов реакції до розробки нових каталізаторів, від удосконалення методів очищення продуктів до порівняння властивостей різних естерів. Ці різноманітні підходи відображають прагнення наукової спільноти створити більш ефективні, екологічні та економічно вигідні технології виробництва біопалива з рослинних олій.

Формулювання мети дослідження

Дослідження націлене на з'ясування, як найефективніше синтезувати біопаливо з рослинних олій, порівнюючи процеси з використанням метилового та етилового спиртів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Світ зіткнувся з двома серйозними викликами – нестачею енергоресурсів та погіршенням стану довкілля через надмірне використання викопного палива. На цьому тлі біопаливо з рослинної сировини стає не просто альтернативою, а справжнім рятівним колом для нашої енергетики. Особливо перспективним залишається процес переестерифікації – перетворення рослинних олій за допомогою спиртів у біодизель, який може замінити звичайне дизпаливо. І тут багато залежить від вибору спирту – він визначає не лише якість кінцевого продукту, але й наскільки вигідним та екологічним буде весь процес виробництва.

Метиловий спирт давно закріпився у виробництві біодизеля – він доступний, недорогий і добре вступає в реакцію. Але в нього є суттєві недоліки: він токсичний і зазвичай виробляється з невідновлюваних ресурсів, що частково нівелює екологічність біопалива. Етиловий спирт пропонує цікаву альтернативу – його можна повністю отримати з рослинної сировини шляхом ферментації, він менш шкідливий для здоров'я, а паливо на його основі краще працює при низьких температурах. Проте використання етанолу створює свої виклики – він повільніше реагує, складніше відділяється від води і коштує дорожче.

Наше експериментальне порівняння обох спиртів у різних умовах дозволяє знайти золоту середину – визначити, коли який спирт ефективніший і як налаштувати процес для отримання найкращих результатів. Ми ретельно проаналізували якість отриманого біопалива, перевірили його відповідність міжнародним стандартам та оцінили екологічний вплив. Такі дослідження – не просто теорія, вони мають прямий вплив на розвиток вітчизняного виробництва біопалива і допомагають нам зробити крок до енергетичної незалежності та чистішого довкілля.

Було виконано п'ять серій синтезу біодизелю із застосуванням етилового спирту, ріпакової та соняшникової олій. Для всіх дослідів спирт додавали з надлишком у 50 % відносно стехіометричної кількості.

Синтез проводили відповідно до стандартної технології: температура процесу становила 60 °C, а тривалість реакції – 60 хвилин. Кількісні співвідношення реагентів, використаних у процесі, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахункова кількість компонентів взятих для синтезу

Показник	Ріпакова олія	Соняшникова олія
Маса олії, г	100	100
Маса спирту, г	19,31	21,35
Маса каталізатору (КОН), г	2	2

У ході експериментів визначали об'єм біодизельної та гліцеринової фракцій, а також їхню густину. На основі отриманих даних розраховували практичну масу біодизелю та гліцерину, після чого обчислювали вихід біодизельної фракції відносно теоретичного значення [13, с. 428].

Результати досліджень і відповідних розрахунків для ріпакової олії наведено у таблиці 2, а для соняшникової олії – у таблиці 3 (при надлишку етилового спирту 50 %).

Таблиця 2

Експериментальні дані синтезу метилових естерів з ріпакової олії

№	Назва отриманої речовини	Об'єм, см³	Густина, г/см³	Маса практична, г	Маса теоретична, г	Вихід фракції від теоретичного, %
1	Біодизель (ефірна фракція)	113	0,875	98,86	105,19	93,98
2	Гліцеринова фракція	16,35	1,251	20,45	–	–

Таблиця 3

Експериментальні дані щодо синтезу метилових естерів із соняшникової олії

№	Назва отриманої речовини	Об'єм, см³	Густина, г/см³	Маса практична, г	Маса теоретична, г	Вихід фракції від теоретичного, %
1	Біодизель (ефірна фракція)	113	0,875	98,86	105,19	93,98
2	Гліцеринова фракція	16,35	1,251	20,45	–	–

Дослідження оптимальних температурних умов для синтезу біодизелю на основі етилового спирту показали, що ефективність процесу залежить від температури. Експерименти проводили з використанням ріпакової олії та етанолу, змінюючи температурні параметри. Найкращі результати були досягнуті при надлишку спирту у 50 % та 25 % від теоретично необхідної кількості. Отримані дані представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

Дослідження впливу температурних умов на синтез біодизелю з етанолу

Температура, °С	Час до початку відділення гліцерину, хв	Вміст гліцеринової фракції, %	Ефективність процесу
20	80	15,6	Низька швидкість
30	25	15,4	Оптимальний режим
40	20	15,5	Оптимальний режим
50	15	15,8	Зростання побічних ефектів
60	10	16,3	Надмірне утворення гліцерину

Аналіз результатів показав, що підвищення температури прискорює перебіг реакції, але одночасно сприяє збільшенню кількості гліцеринової фракції, що негативно впливає на вихід цільового продукту [11]. В зв'язку з цим, оптимальним діапазоном температур для процесу є 30–40 °С, оскільки саме за цих умов досягається баланс між швидкістю реакції та максимальним виходом біодизелю.

Експериментальні дані з таблиці 4 були візуалізовані у вигляді двох графіків:

На рисунку 1 представлена динаміка часу появи гліцеринової фази за різних температур при застосуванні етанолу [6, с. 444].

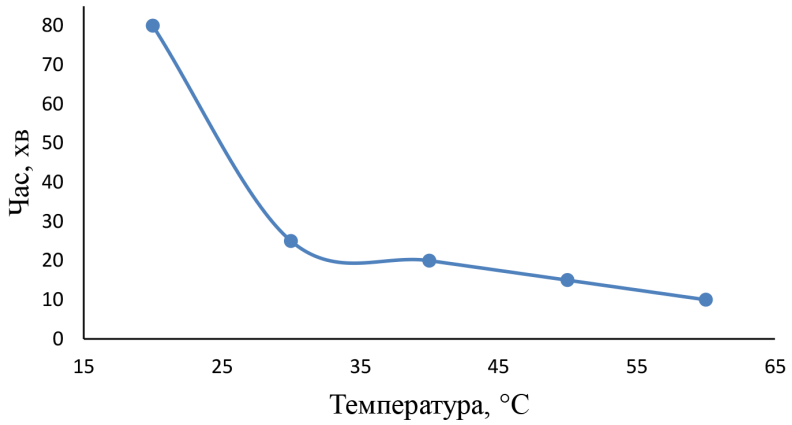


Рис. 1. Залежність часу відділення гліцеринової фази від температури процесу при синтезі біодизелю з етанолу

Рисунок 2 відображає кореляцію між температурними умовами та кількістю гліцерину, що утворюється при використанні метанолу.

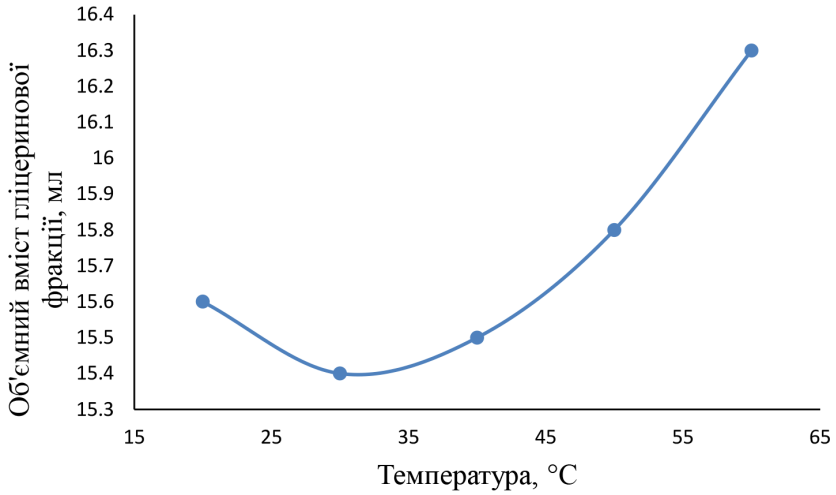


Рис. 2. Залежність об'ємного вмісту гліцеринової фази від температури синтезу біодизелю з етанолу

Дослідження підтвердили, що використання етилового спирту для синтезу біодизелю є таким же ефективним, як і застосування метанолу. Оптимальна кількість етанолу становить 50–55 % від стехіометричної кількості, що більше, ніж потрібно для метанолу (20–25 %) [10, с. 99]. Такі умови забезпечують гарне відділення гліцеринової фракції та стабільність процесу.

Головним показником цінності проведених досліджень є якість отриманого продукту – біодизелю отриманого із етилового спирту. У таблиці 5 наведені результати порівняльного аналізу головних показників отриманих нами продуктів, та їх порівняння з європейськими нормами згідно DINE 51606, які отримані у сертифікованій лабораторії Українського науково-дослідного інституту нафтопереробної промисловості "МАСМА" (м. Київ) [7, с. 14].

Таблиця 5

Порівняльний аналіз якості метилових та етилових естерів згідно зі стандартом DIN EN 51606

№	Показник якості	Норма DIN EN 51606	Метиловий естер	Етиловий естер
1	Густина при 20 °C, г/см³	0,875	0,885	0,8824
2	Кінематична в'язкість при 40 °C, мм²/с	3,5–5,0	5,5	6,9
3	Кінематична в'язкість при 20 °C, мм²/с	3,5–5,0	9,01	10,36
4	Температура спалаху, °C	≥110	124	121
5	Цетанове число	≥49	49	49
6	Вміст метанолу, %	≤0,3	0,08	–
7	Вміст етанолу, %	≤0,3	–	0,1
8	Вміст метилових естерів, %	≥96,5	97,6	–
9	Вміст етилових естерів, %	≥96,5	–	96,3
10	Вміст монолгіцеридів, %	≤0,8	≤0,8	0,7
11	Вміст дигліцеридів, %	≤0,4	≤0,4	0,1
12	Вміст тригліцеридів, %	≤0,4	≤0,4	0,2
13	Вміст вільного гліцерину, %	≤0,02	≤0,02	0,02
14	Вміст загального гліцерину, %	≤0,25	≤0,25	0,24

Експерименти проводили з використанням 500 мл соєвої олії (очищеної та неочищеної), що дозволило отримати 85 см³ та 138 см³ гліцеринової фракції відповідно. Для нейтралізації застосовували 80 % спиртовий розчин сірчаної кислоти, який додавали краплями при інтенсивному перемішуванні. Після обробки суміш розділялася на дві фази: верхню органічну (33 см³) та нижню водно-гліцеринову (56 см³), що підтвердило ефективність методу [9].

Очищення та вихід гліцерину. Технологія передбачала подальше відокремлення кристалічного сульфату калію та перегонку летких компонентів при 160 °C. В результаті отримано 44 г технічного гліцерину з теоретично можливим максимумом 50 г. Ці дані свідчать про високу ефективність процесу та можливість його масштабування для промислового виробництва біодизелю з етанолу.

Після нейтралізації спостерігалося утворення щільної емульсії, яка не піддавалася фільтрації. Це пов'язано з високим вмістом моногліцеридів та низькою концентрацією чистого гліцерину, що свідчить про недостатній ступінь переетерифікації (65–70 %) через використання неочищеної олії.

Утворення емульсії ускладнює поділ фаз і знижує вихід корисного продукту на 15–20 %. Для запобігання такому ефекту необхідно застосовувати очищену сировину та оптимізувати умови переетерифікації, щоб забезпечити повнішу конверсію тригліцеридів.

Висновки та перспективи подальших досліджень у даному напрямі

Експериментальні дослідження довели, що процес переетерифікації з етанолом досягає максимальної ефективності при температурі 30–40 °С. Даний діапазон забезпечує оптимальний баланс між швидкістю реакції та якістю кінцевого продукту. При цьому необхідний надлишок етилового спирту становить 50–55 %, що на 25–30 % більше порівняно з метанолом.

Отримані біодизельні палива на основі обох спиртів повністю відповідають вимогам європейського стандарту DIN EN 51606. Етилові естери демонструють дещо кращі низькотемпературні властивості та меншу токсичність, проте вимагають більш ретельного контролю вмісту залишкового спирту.

Використання неочищеної олії призводить до значного зниження ефективності процесу. Як показали досліди, це викликає утворення щільних емульсій, що ускладнює поділ фаз та зменшує вихід гліцерину на 15–20 %. Оптимальні результати досягаються лише при застосуванні очищеної олії.

Результати досліджень підтверджують можливість промислового використання етанолу для виробництва біодизелю. Для масштабування процесу рекомендовано дотримуватись встановлених температурних режимів, контролювати якість сировини та оптимізувати кількість каталізатора. Це дозволить отримувати якісне паливо з мінімальними витратами.

Список використаної літератури

1. Столяренко Г. С., Орлов С. П., Фоміна Н. М., Ющенко С. Л. Проблеми виробництва біодизелю в Україні / Збалансований (сталий) розвиток України – пріоритет національної політики // Матеріали всеукраїнської наукової екологічної конференціїю К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2010. С. 351–355.

2. Yusoff, Mohamad & Xu, Xuebing & Guo, Zheng. (2014). Comparison of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters as Biodiesel Base Stock: a Review on Processing and Production Requirements. Journal of the American Oil Chemists' Society. 91. 10.1007/s11746-014-2443-0

3. Gotovuša, Mia & Huzjak, Paula & Zadravec, Ivana & Zadravec, Martina & Vuković, Jelena & Faraguna, Fabio. (2024). Biodiesel from Higher Alcohols for Removal of Crude Oil Spills from Coastal Sediments. Sustainability. 16. 8574. 10.3390/su16198574

4. Isler, Asli & Karaosmanoğlu, Filiz. (2023). Fatty Acid Ethyl Esters Obtained From Safflower Oil: A Fully Renewable Biofuel. Journal of Energy Resources Technology. 145. 1-38. 10.1115/1.4062870.

5. Ragupathy, Hariprasath & Venkatanagaraju, Erumalla. (2022). Effect of Ultrasonication in Lipid Extraction and Production of Biodiesel from Groundnut Shells. Ecology, Environment and Conservation. 28. 535-539. 10.53550/EEC.2022.v28i01.081

6. Ющенко С. Л., Столяренко Г. С. Виробництво етилових естерів жирних кислот як біодизеля – приклад переходу до збалансованого природокористування // Ситник К. М., Білявський Г. О., Вадзюк С. Н., Разметаєв С. В., Тимочко Т. В. – Збалансований розвиток України – шлях до здоров'я і добробуту нації // Матеріали Українського екологічного конгресу, 21 вересня 2007 р. – К. : Центер екологічної освіти та інформації, 2007. – С. 444.

7. Ющенко С. Л., Столяренко Г. С., Мислюк Є. В. Застосування явища кавітації і кавітаційного реактору для інтенсифікації процесів хімічної технології // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технологічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Сучасні проблеми технології неорганічних речовин» / Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2008. С. 14.

8. Bacha, Abir & Alonazi, Mona & Alharbi, Mona & Horchani, Habib & Abdelmalek, Imen. (2022). Biodiesel Production by Single and Mixed Immobilized Lipases Using Waste Cooking Oil. Molecules. 27. 8736. 10.3390/molecules27248736

9. Badve MP, Alpar T, Pandit AB, Gogate PR, Csoka L (2015) Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. Ultrason Sonochem 22:272–277. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.017

10. Xun Sun, Gaoju Xia, Weibin You, Xiaoqi Jia, Sivakumar Manickam, Yang Tao, Shan Zhao, Joon Yong Yoon, Xiaoxu Xuan, Effect of the arrangement of cavitation generation unit on the performance of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 99 2023, 106544, ISSN 1350-4177, https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106544

11. Bimestre TA, Júnior JAM, Botura CA, Canettieri E, Tuna CE (2020) Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment. Biores Technol 311:123540. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123540

12. Calıskan, Y.; Yatmaz, H. C.; Bektas, N. Photocatalytic oxidation of high concentrated dye solutions enhanced by hydrodynamic cavitation in a pilot reactor. *Process Saf. Environ. Prot*. 2017, *111*, 428–438.

13. Ющенко С. Л., Столяренко Г. С., Мислюк Є. В. Застосування явища кавітації і кавітаційного апарату для інтенсифікації процесів хімічної технології // Збірник матеріалів конференції IV Української науково-технічної конференції з технології неорганічних речовин, 14–16 жовтня 2008 р., Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2008.

References

1. Stoliarenko, H. S., Orlov, S. P., Fomina, N. M., & Yushchenko, S. L. (2010). Problemy vyrobnytstva biodyzelju v Ukraini. In *Zbalansovanyj (stalyy) rozvytok Ukrainy – priorytet natsional'noyi polityky: Materialy vseukrayins'koyi naukovoyi ekolohichnoyi konferentsiyi* (pp. 351–355). Kyiv : Tsentr ekolohichnoyi osvity ta informatsiyi. [in Ukrainian].

2. Yusoff, M., Xu, X., & Guo, Z. (2014). Comparison of fatty acid methyl and ethyl esters as biodiesel base stock: A review on processing and production requirements. *Journal of the American Oil Chemists' Society, 91*, 1–16. https://doi.org/10.1007/s11746-014-2443-0 [in English].

3. Gotovusa, M., Huzjak, P., Zadravec, I., Zadravec, M., Vukovic, J., & Faraguna, F. (2024). Biodiesel from higher alcohols for removal of crude oil spills from coastal sediments. *Sustainability, 16*(19), 8574. https://doi.org/10.3390/su16198574 [in English].

4. Isler, A., & Karaosmanoglu, F. (2023). Fatty acid ethyl esters obtained from safflower oil: A fully renewable biofuel. *Journal of Energy Resources Technology, 145*(1), 1–38. https://doi.org/10.1115/1.4062870 [in English].

5. Ragupathy, H., & Venkatanagaraju, E. (2022). Effect of ultrasonication in lipid extraction and production of biodiesel from groundnut shells. *Ecology, Environment and Conservation, 28*(1), 535–539. https://doi.org/10.53550/EEC.2022.v28i01.081 [in English].

6. Yushchenko, S. L., & Stoliarenko, H. S. (2007). Vyrobnytstvo etylovykh esteriv zhyrnykh kyslot yak biodyzelja – pryklad perekhodu do zbalansovanoho pryrodokorystuvannja. In K. M. Sytnyk, H. O. Biliavskyi, S. N. Vadziuk, S. V. Razmetaiev, & T. V. Tymochko (Eds.), *Zbalansovanyj rozvytok Ukrainy – shliakh do zdorov'ja i dobrobutu natsiyi: Materialy Ukrayins'koho ekolohichnoho konhresu, 21 veresnja 2007 r*. (p. 444). Kyiv : Tsentr ekolohichnoyi osvity ta informatsiyi. [in Ukrainian].

7. Yushchenko, S. L., Stoliarenko, H. S., & Mysliuk, E. V. (2008). Zastosuvannja yavyshcha kavitatsiyi i kavitatsiynoho reaktoru dlya intensyfikatsiyi protsesiv khimichnoyi tekhnolohiyi. *Zbirnyk naukovykh prats' Dniprodzerzhyns'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu (tekhnichni nauky): Suchasni problemy tekhnolohiyi neorhanichnykh rechovyn*, (special issue), 14. [in Ukrainian].

8. Bacha, A., Alonazi, M., Alharbi, M., Horchani, H., & Abdelmalek, I. (2022). Biodiesel production by single and mixed immobilized lipases using waste cooking oil. *Molecules, 27*(24), 8736. https://doi.org/10.3390/molecules27248736 [in English].

9. Badve, M. P., Alpar, T., Pandit, A. B., Gogate, P. R., & Csoka, L. (2015). Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. *Ultrasonics Sonochemistry, 22*, 272–277. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.017 [in English].

10 Sun, X., Xia, G., You, W., Jia, X., Manickam, S., Tao, Y., Zhao, S., Yoon, J. Y., & Xuan, X. (2023). Effect of the arrangement of cavitation generation unit on the performance of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor. *Ultrasonics Sonochemistry, 99*, 106544. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106544 [in English].

11. Bimestre, T. A., Júnior, J. A. M., Botura, C. A., Canettieri, E., & Tuna, C. E. (2020). Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment. *Bioresource Technology, 311*, 123540. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123540 [in English].

12. Caliskan, Y., Yatmaz, H. C., & Bektas, N. (2017). Photocatalytic oxidation of high concentrated dye solutions enhanced by hydrodynamic cavitation in a pilot reactor. *Process Safety and Environmental Protection, 111*, 428–438. [in English].

13. Yushchenko, S. L., Stoliarenko, H. S., & Mysliuk, E. V. (2008). Zastosuvannja yavyshcha kavitatsiyi i kavitatsiynoho aparatu dlya intensyfikatsiyi protsesiv khimichnoyi tekhnolohiyi. In *Materialy IV Ukrayinskoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi z tekhnolohiyi neorhanichnykh rechovyn, 14–16 zhovtnja 2008 r*. (Dniprodyzerzhyns'k : DDTU). [in Ukrainian].

УДК 531.1:631.362.3:633.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.2

А. В. АНТОНЕЦЬ
кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри будівництва та професійної освіти
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-2332-6711

О. М. ІВАНОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри будівництва та професійної освіти
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-1761-9913

С. В. КУЧЕРЕНКО
аспірант кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0009-2308-0182

Б. М. ЯРОШЕНКО
аспірант кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0006-0169-1909

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТРОЛЬВАНОГО РУХУ ЗЕРНА ПО ТРЬОМ РЕГУЛЬОВАНИМ ПОЛИЦЯМ КАСКАДНОЇ УСТАНОВКИ

У даній роботі виконано дослідження гравітаційного руху зернової маси по полицям каскадної установки направлене на розробку та обґрунтування аналітичної моделі контрольованого гравітаційного руху зерна по трьом регульованим пересипним ділянкам з відповідними співвідношеннями кутів їх нахилу.

При завантаженні падаюче зі значної висоти зерно ударяючись об дно та стінки ємності може травмуватися. Зазначена проблема потребує розробки та дослідження технічного рішення яке б забезпечувало регулювання швидкості руху зерна при його завантаженні у ємності. Пристрої, які призначаються для зменшення і стабілізації швидкості завантаження повинні бути не складними у їх виготовленні та експлуатації. Запропонована модель враховує початкову висоту падіння зерна на першу розгінну ділянку, висоту падіння зерна з однієї полиці на іншу, довжини пересипних полиць, а також коефіцієнт тертя між шаром зерна та матеріалом полиць.

На основі розробленої аналітичної моделі руху зерна та запропонованих рівнянь для знаходження співвідношень між трьома кутами нахилу пересипних полиць була запропонована принципова схема гравітаційної установки із трьох полиць. Полиці можуть вільно повертатись на осях на необхідний кут відносно горизонтальної площини. Для першої полиці кут нахилу α вибирався з варіативного ряду 45°, 55°, 65° та 75°. Для кута β максимальна його варіація не перевищує 0,59°, а кут γ змінюється в максимальній своїй величині на 1,4°. В той же час різниця між значеннями кута γ для різних діапазонів може відрізнятися більше ніж 10°. Отримані результати та їх аналіз свідчать про те, що представлена аналітична модель та відповідна гравітаційно-каскадна установка за рахунок трьох ділянок дозволяє вирішити проблему контрольованого руху швидкості зерна для його завантаження у ємності без травмування,.

Ключові слова: *аналітична модель руху зерна, каскадна установка, три пересипні полиці, кути нахилу.*

A. V. ANTONETS
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Construction and Vocational Education
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-2332-6711

O. M. IVANOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Construction and Vocational Education
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-1761-9913

S. V. KUCHERENKO
Postgraduate Student at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0009-2308-0182

B. M. YAROSHENKO
Postgraduate Student at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0006-0169-1909

THE RESEARCH OF CONTROLLED GRAIN MOVEMENT ON THREE ADJUSTABLE SHELVES OF A CASCADE INSTALLATION

In this work, a study of the gravitational movement of grain mass along the shelves of a cascade installation was carried out, aimed at developing and substantiating an analytical model of controlled gravitational movement of grain along three adjustable transfer sections with the corresponding ratios of their inclination angles.

When loading, grain falling from a considerable height, hitting the bottom and walls of the container, can be injured. This problem requires the development and study of a technical solution that would provide regulation of the speed of grain movement when loading it into the container. Devices designed to reduce and stabilize the loading speed should not be complicated in their manufacture and operation. The proposed model takes into account the initial height of the grain fall onto the first acceleration section, the height of the grain fall from one shelf to another, the length of the transfer shelves, as well as the friction coefficient between the grain layer and the material of the shelves.

Based on the developed analytical model of grain movement and the proposed equations for finding the relationships between the three angles of inclination of the transfer shelves, a schematic diagram of a gravity installation with three shelves was proposed. The shelves can freely rotate on their axes to the required angle relative to the horizontal plane. For the first shelf, the angle of inclination α was chosen from the variational series of 45°, 55°, 65° and 75°. For the angle β, its maximum variation does not exceed 0.59°, and the angle γ changes in its maximum value by 1.4°. At the same time, the difference between the values of the angle γ for different ranges can differ by more than 10°. The results obtained and their analysis indicate that the presented analytical model and the corresponding gravity-cascade installation due to three sections allow solving the problem of controlled grain velocity movement for loading it into containers without injury.

Key words: *analytical model of grain movement, cascade installation, three transfer shelves, inclination angles.*

Постановка проблеми

Для зберігання зерна на елеваторах використовують висотні металеві силоси з плоским бетонним дном. Завантаження зернової маси в силос з висоти 12…30 метрів призводить до підвищення кількості битих зернівок більше ніж у 8 разів [1], майже 80 % загальної деформації зерна відбувається на стадії первинного завантаження у силоси [2]. Таким чином, зниження ушкодження зернового вантажу на етапі завантаження його у силоси є важливою проблемою, необхідність якої обумовлена втратами зерна, що зберігається в силосах. Дана проблема потребує пошуку шляхів безпечного завантаження силосів зерном без його травмування. Варіантом подолання проблеми завантаження висотних силосів зерном без його травмування є створення каскадного завантажувального пристрою, що дозволяє здійснювати контроль швидкості руху зерна, під час його гравітаційного завантаження, та математично обґрунтувати його роботу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Певні дослідження щодо контрольованого руху зерна описані в роботах [3] та [4]. В [3] наведені залежності зміни швидкості руху зернового вантажу у похилому каналі з трьома змінними кутами. В даній статті зроблений опис установки, яка складається із прямолінійних ділянок виконаних у вигляді жолобів з яких одна ділянка розгінна, а дві інші гальмівні. В роботі [4] представлений периферійний відкритий гвинтовий канал з розгінною та гальмівною ділянками, що кріпиться на внутрішній боковій поверхні силосу для гравітаційного завантаження високих споруд зерном. Дослідження руху зернової маси по гвинтовій лінії описано також в роботі [5], де наведено рівняння руху матеріальної точки по поверхні спірального жолоба під дією сили тяжіння. В роботі [6] для зменшення травмування і рівномірного розподілення зерна пропонується використовувати тороподібну тарілку яка встановлюється в нижній частині гофрованого завантажувального рукава. Недоліком пристрою є розміри тарілки та складність її виготовлення. В [7] для рівномірного розподілу зерна проаналізовані завантажувальні пристрої котрі монтуються під горловиною силосу. Недоліком є травмування зерна силами інерції при ударі зерна об стінки ємності.

Отже, незважаючи на значну кількість пристроїв та досліджень присвячених питанням рівномірного та без ударного завантаження силосів зерновим матеріалом проблема завантаження висотних силосних споруд залишається актуальною і не в повній мірі вирішеною. Існуючі пристрої не в змозі контролювати і виконувати регулювання швидкості руху зернового матеріалу під час його гравітаційного завантаження, або є складними у їх

виготовленні та експлуатації. Тому, нагальною проблемою є необхідність розробки завантажувальної гравітаційної каскадної установки, яка забезпечує контроль швидкості руху зерна за рахунок різних кутів нахилу полиць.

Формулювання мети дослідження

Розробка аналітичної моделі контрольованої швидкості руху зерна по трьом пересипним полицям завантажувальної гравітаційно-каскадної установки, що дасть змогу визначити її основні геометричні параметри та співвідношення між трьома кутами нахилу полиць.

Викладення основного матеріалу дослідження

При проведенні теоретичних досліджень був застосований закон збереження енергії, перетворення та графічні визначення на основі використання законів теоретичної механіки.

Для аналізу руху зерна по трьом пересипним полицям запропонована принципова схема гравітаційно-каскадної установки для контрольованого завантаження силосів зерном (див. рис. 1). Установка складається із бункера 1, заслінки 2, кріплення 3, металевого корпуса у вигляді паралелепіпеду 4, в середині якого шарнірно встановлені три пересипні полиці 5 і 6, з довжиною l та кутами нахилу α, β та γ відповідно.

Вважаємо, що маса зерна висипається із бункера дослідної установки і має стаціонарний потік. Для зменшення травмування зерна необхідно щоб кінцева швидкість зерна в кінці руху по останній полиці була однаковою з початковою швидкістю потоку на початку першої полиці, але не менша за неї $V_{поч} \le V_{кін}$ [3, 4]. Для спрощення подальших розрахунків будемо вважати, що ці швидкості рівні між собою $V_{поч} = V_{кін} = V_0$ [4]. Висота падіння h між всіма трьома полицями є однаковою. В момент падіння зернової маси з отвору бункера на початковий край першої ділянки відбувається перехід її потенціальної енергії в кінетичну, зерно набуває швидкість $V_0 = \sqrt{2gh_0}$.

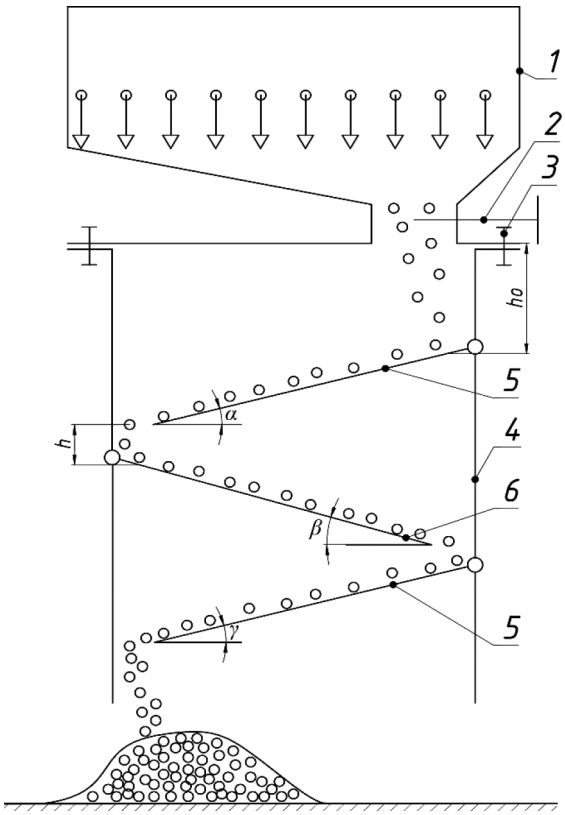


Рис. 1. Принципова схема каскадної установка з трьома полицями

Продовжуючи рух, зерновий потік збільшує свою швидкість до V_{max} проходячи шлях l по першій ділянці, розташованій під кутом α до горизонту. Врахувавши перехід частини потенціальної енергії в кінетичну, маємо:

$$\frac{mV_0^2}{2}\sin\alpha + mgl_1\sin\alpha - \mu mgl_1\cos\alpha = \frac{mV_{\max}^2}{2}.$$

Після проходження першої полиці зерно падає з відстані h на другу полицю з кутом нахилу β до горизонту, де рух здійснюється завдяки отриманої до цього максимальної кінетичної енергії на І полиці, додатково набутої кінетичної енергії під час падіння з висоти h та потенціальної енергії зерна. Даному процесу протидіє робота сили тертя, яка за рахунок меншого кута нахилу $\beta \le \alpha$ є вже значно більшою і зумовлює зменшення швидкості з V_{max}

до $\frac{2V_{\max}}{3}$. Тобто, в модель закладається зменшення максимальної швидкості руху зерна на третину, що повинно запобігти згруженню зерна. Врахувавши вище зазначене маємо:

$$\left(\frac{mV_{\max}^2}{2}\sin\alpha + mgh\right)\sin\beta + mgl_2\sin\beta - \mu mgl_2\cos\beta = \frac{m\left(\frac{2V_{\max}}{3}\right)^2}{2}.$$

Рух зернового потоку по третій полиці, розміщеній під кутом γ до горизонту, відбувається аналогічно за рахунок попередньо набутої кінетичної та потенціальної енергії, якій протидіє робота сили тертя, яка за рахунок меншого кута нахилу γ ($\gamma \le \alpha$) спричиняє зменшення швидкості руху зернового потоку з V до початкової V_0.

Об'єднавши вище наведені залежності, отримаємо аналітичну модель гравітаційного руху зерна по трьом полицям каскадної установки:

$$\begin{cases} mgh_0 = \dfrac{mV_0^2}{2} \\ \dfrac{mV_0^2}{2}\sin\alpha + mgl_1\sin\alpha - \mu mgl_1\cos\alpha = \dfrac{mV_{\max}^2}{2} \\ \left(\dfrac{mV_{\max}^2}{2}\sin\alpha + mgh\right)\sin\beta + mgl_2\sin\beta - \mu mgl_2\cos\beta = \dfrac{2mV_{\max}^2}{9} \\ \left(\dfrac{2mV_{\max}^2}{9}\sin\beta + mgh\right)\sin\gamma + mgl_1\sin\gamma - \mu mgl_1\cos\gamma = \dfrac{mV_0^2}{2} \end{cases}. \quad (1)$$

З рівнянь 1–3 системи (1) маємо рівняння що визначає $\angle\beta$ через заданий $\angle\alpha$:

$$((h_0 + l)\sin^2\alpha - \mu l\sin\alpha\cos\alpha + h + l)\sin\beta - \mu l_2\cos\beta = \frac{4}{9}(h_0\sin\alpha + l\sin\alpha - \mu l\cos\alpha). \quad (2)$$

Прирівнявши перше, друге і четверте рівняння системи (1) та спростивши вираз маємо рівняння що визначає $\angle\gamma$ через кути $\angle\alpha$ і β:

$$\left(\frac{4}{9}(h_0 + l)\sin\alpha\sin\beta - \frac{4}{9}\mu l\cos\alpha\sin\beta + h + l\right)\sin\gamma - \mu l\cos\gamma = h_0. \quad (3)$$

Розв'яжемо рівняння (2) при заданому куті α для першої ділянки. Перший коефіцієнт зліва і праву сторону рівняння (2) позначимо через a і b відповідно. Отримаємо тригонометричні рівняння виду

$$a\sin\beta - \mu l\cos\beta = b;$$
$$a = ((h_0 + l)\sin^2\alpha - \mu l\sin\alpha\cos\alpha + h + l);$$
$$b = \frac{4}{9}(h_0\sin\alpha + l\sin\alpha - \mu l\cos\alpha).$$

Розв'яжемо рівняння за допомогою переходу до половинного кута, отримаємо вираз, що описує залежність між кутами α і β:

$$\beta = 2\,\mathrm{arctg}\left(\frac{-a + \sqrt{a^2 + (\mu^2 l_2^2 - b^2)}}{\mu l_2 - b}\right) + 2\pi k. \quad (4)$$

Аналогічно розв'яжемо рівняння (3), ввівши відповідні заміни:

$$\gamma = 2\,\mathrm{arctg}\left(\frac{-c + \sqrt{c^2 + (\mu^2 l_2^2 - d^2)}}{\mu l_2 - d}\right) + 2\pi k. \quad (5)$$

З (4) і (5) маємо систему рівнянь, яка визначає кути β та γ через заданий кут α:

$$\begin{cases} \beta = 2arctg\left(\dfrac{-a+\sqrt{a^2+(\mu^2 l^2-b^2)}}{\mu l-b}\right)+2\pi k \\ a=(h_0+l)\sin^2\alpha-\mu l\sin\alpha\cos\alpha+h+l \\ b=\dfrac{4}{9}\left(h_0\sin\alpha+l\sin\alpha-\mu l\cos\alpha\right) \\ \gamma = 2arctg\left(\dfrac{-c+\sqrt{c^2+(\mu^2 l_2^2-d^2)}}{\mu l_2-d}\right)+2\pi k \\ c=\dfrac{4}{9}(h_0+l)\sin\alpha\sin\beta-\dfrac{4}{9}\mu l\cos\alpha\sin\beta+h+l \\ d=h_0 \end{cases} \quad (6)$$

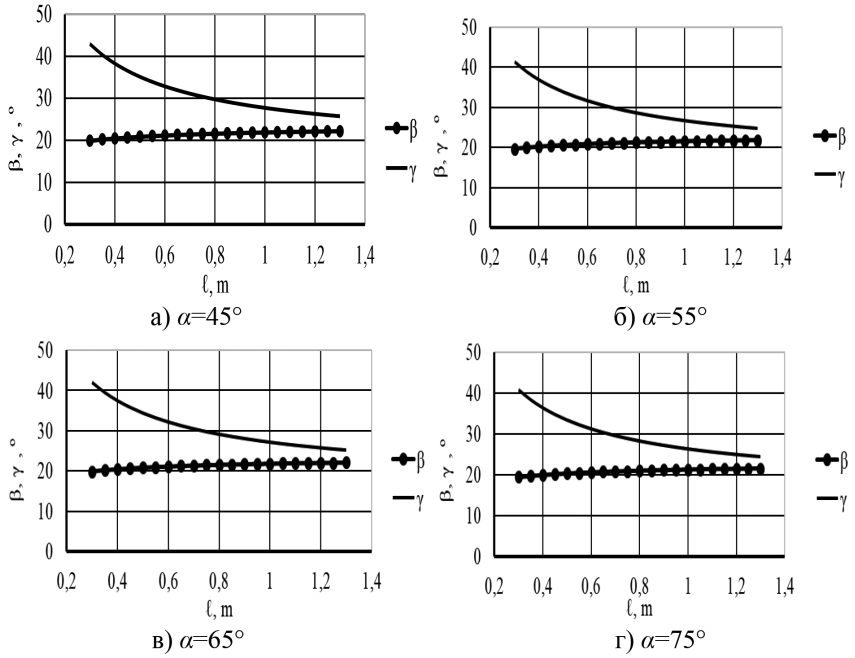
Аналітична модель (1) і (6) дає можливість знаходити співвідношення кутів нахилу β та γ відповідно другої і третьої полиці в залежності від кута α першої пересипної полиці для забезпечення умови однаковості початкової та кінцевої швидкості зернової маси. Модель враховує початкову висоту падіння зерна h_0 на першу полицю, відстань між полицями h, довжину полиць l, а також коефіцієнт тертя μ між шаром зерна та матеріалом пластин.

Геометричні параметри каскадної установки та їх обговорення.

Дослідження характеру зміни параметрів гравітаційно-каскадної установки проводились за наступних умов: висота падіння h = 0,2 м; довжина усіх полиць l; початкова висота падіння h_o = 0,3 м; кути нахилу полиць β ≤ α, γ ≤ α. В якості змінних факторів було прийнято кут нахилу α першої полиці та довжину полиць l. При цьому кут α змінювався в проміжку від 45° до 75°, а довжина полиць приймалась в діапазоні 0,3, …, 1,3 м.

Визначальними параметрами теоретичних досліджень були кут β нахилу другої полиці та кут γ нахилу третьої полиці. При цьому, аналізу піддавались ті результати, де обидва кути були меншими або дорівнювали куту нахилу першої полиці α. Обрахунок визначальних кутів β та γ відповідно до (6) проводився в кілька етапів, у кожному з яких один із змінних факторів приймав стале значення, а інший варіювався в прийнятих для нього межах.

На рисунку 2 приведені результати визначення кутів β та γ при зміні довжини полиць ℓ у варіативному ряду сталих значень кута нахилу α першої полиці: 45°, 55°, 65° та 75°. На графіках можна відмітити різний характер формування кутів та γ як по тенденції так і за числовим діапазоном своєї зміни при варіюванні довжини полиць ℓ. Кут нахилу другої полиці при збільшенні довжини полиць ℓ для кожного сталого кута α має лінійний характер зростання. При цьому діапазон зміни кута складає від 19,5° до 22,2° для усіх варіантів кута α. На відмінну від кута β, кут γ третьої полиці характеризується своєю нелінійною зміною, подібною до гіперболічного виду,



а) α=45° б) α=55°

в) α=65° г) α=75°

Рис. 2. Залежність кутів β та γ від ℓ та α

і зменшується зі зростанням довжини ℓ. Так, при $\alpha = 45°$: кут γ змінюється в межах 25,72…42,96°, при $\alpha = 55°$ кут γ варіюється від 25,14° до 41,98°, при $\alpha = 65°$ кут γ перебуває в межах від 24,69° до 41,25°, а для кута $\alpha = 75°$ кут γ формується в діапазоні 24,55…40,72°.

При співставленні між собою сформованих діапазонів зміни кута γ можна зазначити про їхню ідентичність як по ширині цих діапазонів, так і по їх граничним значеннях. Зокрема, різниця між мінімальним та максимальним значенням кута γ для кожного із чотирьох діапазонів становить 16,37°…17,24°, відрізняючись між собою на 0,18…0,4°. При цьому відмінність по мінімальними значеннями кута γ не перевищує 1,88°, а при порівнянні максимальних значень різниця не є більшою за 2,24°. Отримані результати свідчать, що кут нахилу першої полиці не відіграє суттєвого впливу на формування визначальних кутів на відмінну від довжини полиць. Зі збільшенням довжини полиць кут нахилу третьої ділянки може зменшитися на 17,24°, а другої полиці – збільшитися на 2,26°.

На рис. 3 приведені результати визначення кутів β та γ при зміні кута нахилу α розгінних ділянок у варіативному ряду сталих значень довжини полиць ℓ: 0,3, 0,6, 0,9 та 1,2 м.

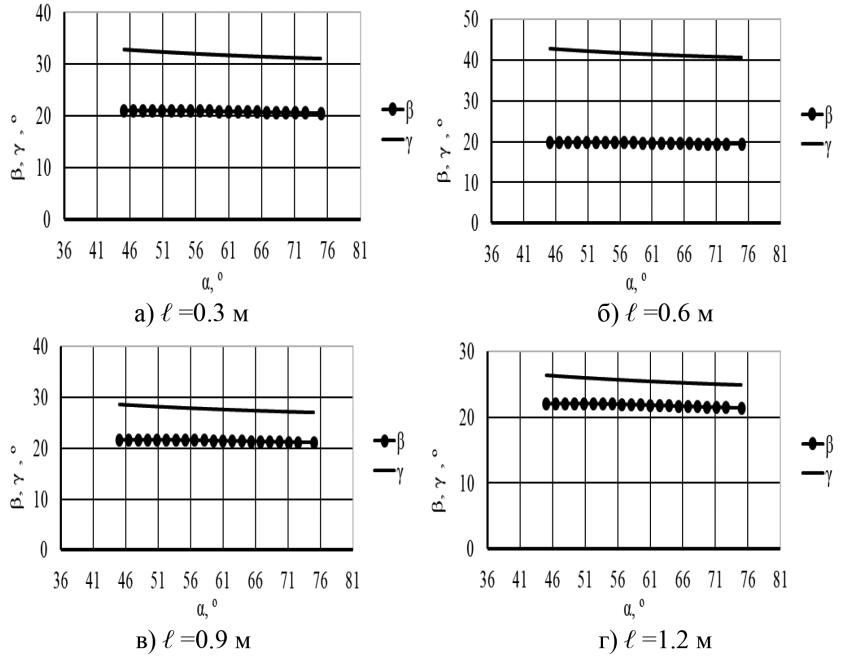


Рис. 3. Залежність кутів β та γ від α та ℓ

Для обох кутів β та γ збільшення кута α призводить до їх зменшення. При цьому характер їхньої зміни максимально наближений до лінійних залежностей, що найбільш яскраво простежується для кута γ. У свою чергу, залежність кута β від α при різній довжині l представляє собою майже пологу ділянку прямої, на границі якого зменшення кута β відбувається на незначну величину – 0,42…0,59°. Абсолютне ж значення кута β, в залежності від факторів впливу, коливається від 19,89° до 21,48°, що є значно меншим від будь-якого прийнятого кута α та повністю відповідає умові співвідношення між цими кутами. Аналогічно формується і кут γ. Так, при l = 0,3 м в діапазоні зміни α від 45° до 75°, γ зменшується від 42,96 до 40,72°. Зі збільшенням довжини полиць відбувається розширення меж варіювання кута γ. Для l = 0,6 м кут γ поступово зменшується в більш широкому проміжку 32,85…31,15° при зростанні кута α від 45° до 75°. Для l = 0,9 м кут γ зменшується від 28,64° до 27,13°. Для l = 1,2 м кут γ спадає в межах від 26,29° до 24,89°.

Наведенні результати дають змогу стверджувати, що при сталості одного зі змінних факторів, у даному випадку довжини полиць, зміна іншого фактору майже не впливає на формування значень кутів другої та третьої полиці. Так, для кута β максимальна його варіація не перевищує 0,59°, а кут γ змінюється в максимальній своїй величині на 1,4°. В той же час різниця між значеннями кута γ для різних діапазонів може відрізнятися більше ніж на 10°. Тобто довжина полиць має більш суттєвий вплив лише на формування кута орієнтації третьої полиці, а кут нахилу першої полиці має вкрай малий вплив на кути γ та β.

Приймаючи до уваги сформовані та проаналізовані характеристики зміни кутів нахилу полиць гравітаційно-каскадної установки від факторів впливу, можна стверджувати про теоретично досяжну можливість дотримання ключової умови використання установки, а саме рівність швидкості на вході та виході з неї, тобто контрольованого руху зерна.

Висновки

Представлена аналітична модель контрольованого руху зерна по пересипним полицям завантажувальної гравітаційно-каскадної установки визначає залежність кутів нахилу другої і третьої полиці від кута нахилу першої полиці, враховує початкову висоту падіння зерна, відстань між полицями, їх довжину, а також коефіцієнт тертя.

За допомогою розробленої аналітичної моделі проведений теоретичний аналіз співвідношень між кутами нахилу трьох ділянок каскадної установки в залежності від зміни довжини полиць та кута нахилу першої ділянки. На основі цих досліджень запропоновано принципову схему гравітаційно-каскадної з трьома регульованими полицями для завантаження зерна без травмування у висотні силоси. Це дає можливість подальшого використання аналітичної моделі та каскадної установки для потреб промисловості.

Список використаної літератури

1. Chen Z., Wassgren C., Ambrose K. A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures. *Transactions of the ASABE*. 2020. 63(2). 455–475. https://doi.org/10.13031/trans.13643

2. Zeng Ch., Wang Y. Compressive behavior of wheat from confined uniaxial compression tests. International Agrophysics. 2019. 33(3). С. 347–354 doi: 10.31545/intagr/110809.

3. Антонець А. В., Флегантов Л. О., Іванов О. М., Арендаренко В. М. Дослідження контрольованого гравітаційного руху зерна у похилому каналі з трьома змінними кутами нахилу. *Вісник Полтавського державного університету*. 2021. № 3. С. 265–273. doi: 10.31210/visnyk. 2021.03.33

4. Arendarenko V., Antonets A, Ivanov O, Dudnikov I, Samoylenko T. Building an analytical model of the gravitational grain movement in an open screw channel with variable inclination angles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 3(7 (111)). С. 100–112. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235451

5. Pylypaka S., Nesvidomin V., Zaharova T., Pavlenko O., Klendiy M. The investigation of particle movement on a helical surface. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. С. 671–681. doi:10.1007/978-3-030-22365-6_67

6. Arendarenko, V., Samoilenko, T., Ivanov, O., Ryzhkova, T. Results of experimental research on the distribution of a falling grain from a toro-shaped plate on a flat surface. *Scientific Progress & Innovations*. 2023. 26 (1). С. 96–101. doi: 10.31210/spi2023.26.01.15

7. Мельник В. І., Самойленко Т. В. Аналіз напрямків удосконалення конструкції пристроїв для завантаження силосів. *Інженерія природокористування*. 2018. 1(9). С. 83–91.

References

1. Chen Z., Wassgren C., Ambrose K. (2020). A Review of Grain Kernel Damage: Mechanisms, Modeling, and Testing Procedures. *Transactions of the ASABE*, 63(2), 455–475. https://doi.org/10.13031/trans.13643

2. Zeng Ch., Wang Y. (2019). Compressive behavior of wheat from confined uniaxial compression tests. *International Agrophysics*, 33(3), 347–354 doi: 10.31545/intagr/110809

3. Antonets A. V., Flehantov L. O., Ivanov O. M., Arendarenko V. M. (2021). Doslidzhennya kontrol′ovanoho hravitatsiynoho rukhu zerna u pokhylomu kanali z tr′oma zminnymy kutamy nakhylu. [Investigation of controlled gravitational grain movement in an inclined channel with three variable inclination angles]. *Visnyk PDAA*, 3, 265–273. doi: 10.31210/visnyk.2021.03.33 [in Ukrainian].

4. Arendarenko V., Antonets A, Ivanov O, Dudnikov I, SamoyIenko T. (2021). Building an analytical model of the gravitational grain movement in an open screw channel with variable inclination angles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(111)), 100–112. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235451

5. Pylypaka S., Nesvidomin V., Zaharova T., Pavlenko O., Klendiy M. (2020). The investigation of particle movement on a helical surface. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 671–681. doi: 10.1007/978-3-030-22365-6_67

6. Arendarenko V., Samoilenko T., Ivanov O., Ryzhkova T. (2023). Results of experimental researchon the distribution of a falling grain from a toro-shaped plate on a flat surface. *Scientific Progress & Innovations*, 26(1), 96–101. doi: 10.31210/spi2023.26.01.15

7. Melnyk V. I., Samoilenko, T. V. (2018). Analiz napryamkiv udoskonalennya konstruktsiy prystroyiv dlya zavantazhennya sylosiv. [Analysis of directions for improving the design of silo loading devices]. *Inzheneriya Pryrodokorystuvannya*, 1 (9), 83–91 [in Ukrainian].

УДК 664.88:637.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.3

В. С. ВОЛОШИН
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри промислових теплоенергетичних установок
і теплопостачання
Приазовський державний технічний університет
ORCID: 0009-0005-6809-6779

В. А. БУРКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри промислових теплоенергетичних установок
і теплопостачання
Приазовський державний технічний університет
ORCID: 0000-0002-7384-4226

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ПІДХІД ТА ВИКОРИСТАННЯ РЕЗОНАНСНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У сучасному світі питання мінімізації відходів у промисловості набуває особливої актуальності, і хлібопекарське виробництво не є виключенням. Дана стаття присвячена дослідженню проблеми скорочення обсягів відходів у традиційних технологіях виробництва хліба, що широко застосовуються на підприємствах харчової промисловості. Автори наголошують, що, незважаючи на відносно невелику кількість органічних відходів, які, як правило, легко утилізуються або переробляються в післявиробничий період, значною проблемою залишаються енергетичні відходи. Їх обсяги є надзвичайно великими та співмірними зі світовими обсягами виробництва хліба, що робить цю проблему особливо значущою. Аналіз показує, що, незважаючи на наявність сучасних технологій та високі темпи виробництва хліба, питання промислових відходів не втрачає своєї актуальності та потребує комплексного вирішення. В даній роботі запропоновано результати дослідження, спрямованого на визначення теоретично обґрунтованого мінімуму відходів загального типу в технології виробництва хліба. Розроблено інноваційну методику, що дозволяє використовувати принцип термодинамічної двоєдиності. Згідно з цією методикою, принцип розглядається як механізм, що не тільки відповідає за утворення відходів у технологічному процесі, але й як основний фактор, що дозволяє мінімізувати їх утворення безпосередньо в межах самого технологічного циклу. У статті детально проаналізовано межі, які існують у досягненні оптимального результату щодо мінімізації відходів, а також розглянуто розподіл мінімально можливих відходів між різними етапами технологічного процесу. Авторами рекомендовано використовувати модифіковану енергію зовнішнього впливу, яка, на їх думку, є спроможною переробити ту частину сировини, яка за певних умов може потрапити у відходи. За допомогою нової енергії ця сировина набуває інших цінних якостей, що роблять її корисним продуктом в межах того ж технологічного циклу, таким чином зменшуючи обсяги відходів та підвищуючи ефективність виробництва. Окрему увагу в роботі приділено використанню резонансних джерел енергії для досягнення поставленої мети – максимально мінімізувати енергетичні втрати в технологічному процесі виробництва хліба. Посилаючись на теоретично обґрунтований мінімум утворення відходів, автори пропонують метод введення модифікованої енергії резонансних коливань в технологічний процес. Цей метод, як показують результати дослідження, дозволяє не тільки значно (на порядок) знизити втрати теплової енергії, але й за рахунок резонансних взаємодій з молекулами сировинної води, зменшити втрати органічних відходів до максимально можливого рівня – 3 % від загальної кількості сировини, що використовується в технологічному процесі.

Ключові слова: *промислові відходи, виробництво хліба, термодинамічна двоєдиність, мінімальне відходоутворення, енергетичні відходи, резонанс.*

V. S. VOLOSHIN
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Industrial Heat and Power Plants
and Heat Supply
Pryazovskyi State Technical University
ORCID: 0009-0005-6809-6779

V. A. BURKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Industrial Heat and Power Plants
and Heat Supply
Pryazovskyi State Technical University
ORCID: 0000-0002-7384-4226

THERMODYNAMIC APPROACH AND USE OF RESONANT ENERGY FOR WASTE MINIMIZATION IN THE FOOD INDUSTRY

In the modern world, the issue of waste minimization in industry is becoming particularly relevant, and bread-making is no exception. This article is devoted to the study of the problem of reducing waste in traditional bread production technologies, which are widely used in food industry enterprises. The authors emphasize that, despite the relatively small amount of organic waste, which, as a rule, is easily disposed of or processed in the post-production period, energy waste remains a significant problem. Their volumes are extremely large and commensurate with the world's bread production volumes, which makes this problem particularly significant. The analysis shows that, despite the availability of modern technologies and high rates of bread production, the issue of industrial waste does not lose its relevance and requires a comprehensive solution. This paper proposes the results of a study aimed at determining a theoretically justified minimum of general waste in bread production technology. An innovative methodology has been developed that allows using the principle of thermodynamic duality. According to this methodology, the principle is considered as a mechanism that is not only responsible for the formation of waste in the technological process, but also as a main factor that allows minimizing its formation directly within the technological cycle itself. The article analyzes in detail the limits that exist in achieving the optimal result in terms of waste minimization, and also considers the distribution of the minimum possible waste between different stages of the technological process. The authors recommend using modified energy of external influence, which, in their opinion, is capable of processing that part of the raw material that under certain conditions can become waste. With the help of new energy, this raw material acquires other valuable qualities that make it a useful product within the same technological cycle, thus reducing the amount of waste and increasing the efficiency of production. Special attention is paid in the work to the use of resonant energy sources to achieve the goal of minimizing energy losses in the technological process of bread production as much as possible. Referring to the theoretically justified minimum of waste generation, the authors propose a method of introducing modified energy of resonant oscillations into the technological process. This method, as the results of the study show, allows not only to significantly (by an order of magnitude) reduce thermal energy losses, but also, due to resonant interactions with raw water molecules, to reduce losses of organic waste to the maximum possible level – 3 % of the total amount of raw materials used in the technological process.

Keywords: *industrial waste, bread production, thermodynamic duality, minimal waste generation, energy waste, resonance.*

Постановка проблеми

Попри розвиненість сучасних технологій хлібопечення, проблема відходів (органічних та енергетичних) залишається актуальною. Це пов'язано з недостатньою теоретичною базою для розуміння причин їх виникнення. Принцип термодинамічної двоєдиності та розроблена на його основі методика розрахунку теоретичного мінімуму відходів дозволяють визначити можливості технології, знайти способи мінімізації відходів безпосередньо в процесі виробництва та зменшити їх утворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Виробництво хліба, що бере свій початок в епоху розвитку землеробства, протягом тисячоліть зберегло основні етапи технологічного процесу: замішування тіста, ферментація, формування та вистоювання, випікання і охолодження [1, 2]. Сучасні технології, попри модифікації, ґрунтуються на цих базових принципах. Основні фізичні та фізико-хімічні процеси, що відбуваються при виробництві хліба [3]:

– гідратація з набуттям якості клейковини з білкової частини (глютеніну і гліадину) в замісі тіста для утримання бульбашок газу;
– ферментація (анаеробне бродіння) з переробкою борошняного цукру в CO_2 и C_2H_5OH – етанолу;
– термічні зміни з клейстеризацією крохмалю;
– реакція Майяра що супроводжує випічку.

Виробництво хліба, як і будь-який інший технологічний процес, неминуче супроводжується утворенням промислових відходів. Хоча органічні відходи в основному переробляються та утилізуються, найбільшою проблемою є втрати енергії, пов'язані з нагріванням та охолодженням продуктів у процесі виробництва. Якщо органічні відходи утилізуються після його утворення в технологічному процесі на 40–80 % при відносно невеликій їх кількості, то втрати тепла при промисловому виробництві хліба в світі до 300 млн тонн на рік, можуть досягати відчутних розмірів, приблизно $2{,}5 \cdot 10^9$ МДж/рік. Такі втрати практично нікуди не утилізуються і є певною проблемою для цього надзвичайно важливого технологічного процесу.

Цією особливістю технологія виробництва хліба цікава з точки зору унікальної властивості термодинамічної двоєдиності [4] та методів подолання створення відходів із досягненням мінімально можливого відходоутворення в межах самого технологічного процесу. Заради зміни суттєвості частини компонентів вихідної сировини, що складають майбутні відходи J_w, у відповідності до методики [5], до системи слід ввести додаткову енергію E_w потрібної якості, чи змінити вигляд базової енергії до потрібного якісного стану E_0^w.

Формулювання мети дослідження

Розробити та обґрунтувати підходи до мінімізації утворення відходів в технологічному процесі, з метою зменшення потреби в їх переробці та утилізації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Основні сировинні компонент у вигляді($J_0 + J_w$), де J_0 – частина матеріального потоку сировини, з якої створюється товарна продукція) сучасного технологічного процесу виробництва хліба і їх зміст в сировинній складовій представлені в таблиці 1. Тут же представлені основні параметри, необхідні для вивчення особливостей термодинамічного стану виробничої системи, основи яких викладені у вигляді наведеної нижче методики дослідження.

Таблиця 1

Опосередковані аналітичні дані для дослідження процесів утворення відходів при різних способах виробництва хліба

№№ п/п	Параметр	Значення параметру	
Структура вихідної сировини ($J_0 + J_w$) (% від сумарного)			
1	Борошно пшеничне	60	
2	Вода	35	
3	Дріжджі	1 ÷ 2	
4	Сіль	1 ÷ 1,5	
5	Цукор, жири, молочні продукти, штучні розпушувачі та ін.	до 3,0	
	РАЗОМ:	100	
Відходи (J_w) (кг/тонну сировини)			
	Назва відходу	**Кількість, кг/т вихідної сировини**	**Енергетична цінність втрат, кДж/кг вих. сировини**
	Борошно, що не використано в технологічному процесі	50 ÷ 100	120
	Борошняний пил	5 ÷	80 ÷ 90
	Залишки води з тіста (випарювання)	20 ÷ 30	330
	Хімічні додатки, зокрема, дріжджі	15 ÷ 20	50 ÷ 120
	Тісто, яке не підійшло для випічки (брак)	50 ÷ 80	150–220
	Підсушений і зіпсований хліб	85 ÷ 150	120 ÷ 280
	Відходи упаковки (пластик, картон))	30 ÷ 50	–
	РАЗОМ:	225–390	–
	Сумарні енергетичні втрати:	–	850–1160
Енергетичні витрати (кДж на 1 кг сировини)			
	Зовнішня вхідна енергія (E_0),включаючи: – енергію, що витрачається на ферментацію та на нагрівання тіста в процесі замісу – енергію, що необхідна для замісу тіста – енергію, що необхідна для нагрівання тіста – енергію, що витрачається на випарювання води – енергію для адсорбції води крохмалем – енергію необхідну на створення клейковини – енергію, що втрачається у вигляді відходу	2000–2310 20 ÷ 30 50 ÷ 100 100 ÷ 150 500 ÷ 600 80 ÷ 100 50 ÷ 70 850–1160	
	Корисна робота щодо зміни сировини до кінцевого продукту (A_0	~500	
	Зміна внутрішньої енергії в системі (ΔU)	~650	
Енергетичні втрати (ΔQ_w) (кДж на 1 кг сировини)			
	Теплові втрати на етапах: – приготування тіста і заміс – ферментації (бродіння) – формування тіста – випічки – охолодження хліба РАЗОМ:	 70–80 80–100 50–60 470–670 180–250 850–1160	

Приймаючи до уваги всі ключові етапи процесу, тепловий баланс у хлібопекарній технології можна виразити наступним чином: $E_0 = A_0 + \Delta U + \Delta Q_w$, де E_0 – зовнішня енергія, що надається у технологічний процес (кДж/кг сировини), A_0 – корисна робота, що створюється при виробництві хліба (кДж/кг сировини), ΔU – зміна внутрішньої енергії технологічного процесу (кДж/кг сировини), ΔQ_w – безповоротні втрати енергії (кДж/кг сировини). Корисна робота A_0 відображає зміни, які відбуваються в кінцевому продукті і можуть бути виміряні. Вона включає в себе роботу, витрачену на підвищення температури тіста, зміну його структури (трансформації клейковини і газів), а також на зміну фізичних і хімічних властивостей хліба в процесі випічки [2].

Внутрішня енергія ΔU технологічного процесу складається з енергії, завдяки якій стаються екзотермічні фізико-хімічні зміни: утворення клейковини, термічні процеси перетворення крохмалю, реакцію Майяра, утворення скоринки, тепловий ефект реакції бродіння. Ця енергія також витрачається на зміну температури і стану тіста, випаровування води та інші хімічні реакції, що відбуваються в процесі випічки [2].

При наданні в систему додаткової енергії E_w мы не приймаємо до уваги що внутрішня енергія системи при цьому також змінюється, тобто залишаємо $\Delta U = \text{const}$ и запишемо, що $E_0 + E_w \geq \Delta U + (A_0 + A_w)$. Але тут параметр A_w вже означає роботу, що виконана для того, щоб перевести матеріальний потік J_w, з якого раніше отримували відхід, в максимально можливий товарний стан, тобто, в певну корисну продукцію.Узгоджений феноменологічний показник λ у рівнянні Л. Онсагера загального виду $\frac{\Delta S}{E_0} = \frac{J_0 X_0 + J_w X_w}{E_0} \lambda(1-\lambda)$ [7] запишемо у вигляді $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$. Враховуючи принцип взаємності Онсагера для системи в стані, близькому до термодинамічної рівноважності у відносності частин сировини J_0 і J_w, а також встановлене відношення $A_w/A_0 \approx 0{,}62$, показник λ представимо, як

$$\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w} = \frac{A_0/J_0}{A_0/J_0 + A_w/J_w} = \frac{J_w}{(0{,}62 J_0 + J_w)},$$

що буде відповідати вже тому стану сировини J_w, яка буде в майбутньому отримувати зміни, що пов'язані з впливом енергії E_w в термодинамічно нерівноважному стані. При цьому $l \leq 1{,}0$ та наближається до одиниці, вказуючи на область теоретично обґрунтованого мінімального утворення відходів.

Тут і в подальших дослідженнях під термодинамічними силами X_i слід розуміти, зокрема, градієнт зміни одного з силових параметрів, що відносяться до конкретної технічної системи. Причому співвідношення між силами і потоками має бути лінійним за допомогою феноменологічних коефіцієнтів L_{ij} таким чином, що $J_i = \sum_j L_{ij} X_i$. Для самого загального випадку, в умовах технологічного процесу коли має місто перенос речовини (m) та енергії (e) в матеріальних потоках (J_i) за допомогою сил (X_i), що їх створюють, локальне виробництво ентропії можна представити наступним чином: $\sigma[S] = J_0 X_0 + J_w X_w > 0$.

Методика дослідження

Методика дослідження полягала у визначенні основних термодинамічних коефіцієнтів для різних технологій виробництва хліба, незалежно від типу, якості та рецептури. Дослідження охоплює лише традиційну технологію випікання хліба, отриманого з тіста, попередньо підготовленого для досягнення оптимальних органолептичних і фізико-хімічних властивостей, зокрема враховуючи гідратаційні, ферментаційні, теплові та інші характеристики вихідної сировини. Вихідними даними для кожного з розглянутих технологічних процесів є статистична звітність про:

– величину зовнішньої енергії E_0, що надходить у технологічний процес для переробки сировини на одиницю її маси;

– температурні параметри T_i власне технологічного процесу та зовнішнього середовища T_0 для розрахунку зміни ентропії;

– параметри сировини, яка підлягає переробці у конкретному технологічному процесі, а саме:

– параметр матеріального потоку J_0, який витрачається на отримання основної товарної продукції;

– параметр матеріального потоку J_w, який становить весь первісний обсяг сировини у своїй відходоутворюючій частині;

– запропоновану величину додаткової зовнішньої енергії $E_w \leq kE_0$ обраної якості, яка може дозволити вивести матеріальний потік J_w зі стану близького до термодинамічної рівноваги до нерівноважного стану;

Розрахунку підлягали показники:

– величина термодинамічної сили X_0, що забезпечує цілеспрямовану зміну матеріального потоку J_0 до стану товарної продукції;

– величина необхідної термодинамічної сили X_w, яка здатна змінити матеріальний потік J_w до максимальної можливості корисної продукції, у відповідності до типу технологічного процесу;

– зміна ентропії системи, залежно від стану її нерівноважності, відповідно до відомих рівнянь Л. Онсагера, теореми І. Пригожина та ін., залежно від змісту та закономірностей самого технологічного процесу (в дослідженні використовуємо інтегральну ентропію структурованого технологічного процесу, як $\Delta S = \sum \Delta S_k^{\pm} \geq 0$, де E_0^w, відноситься до того з k-их етапів технології, які в даній системі змінюються в дисипативному $(\Delta S_k^{\pm} \pm > 0)$ або репаративному $(\Delta S_k^{\pm} \pm \leq 0)$ напрямках);

– зміна наведеної ентропії системи $\Delta S/E_0$ залежно від феноменологічного показника $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$ з подальшим виявленням його параметрів на кожному наступному n-му етапі ітерації.

Статистична обробка результатів дослідження виконана за допомогою *програмного пакету Statistica 6.0. (StatSoft, Inc., США)*.

Термодинамічні сили в рівнянні Л. Онсагера можна виразити через макроскопічні параметри системи. У нашому випадку ми будемо враховувати тільки термодинамічні сили $X_T = -\frac{1}{T}\nabla T$ (K^{-1}), що викликані температурним градієнтом ∇T. Діаграма для оцінки теоретично обґрунтованого мінімуму відходів, що відносяться до технології промислового виробництва хліба, надана на рис. 1, *а*.

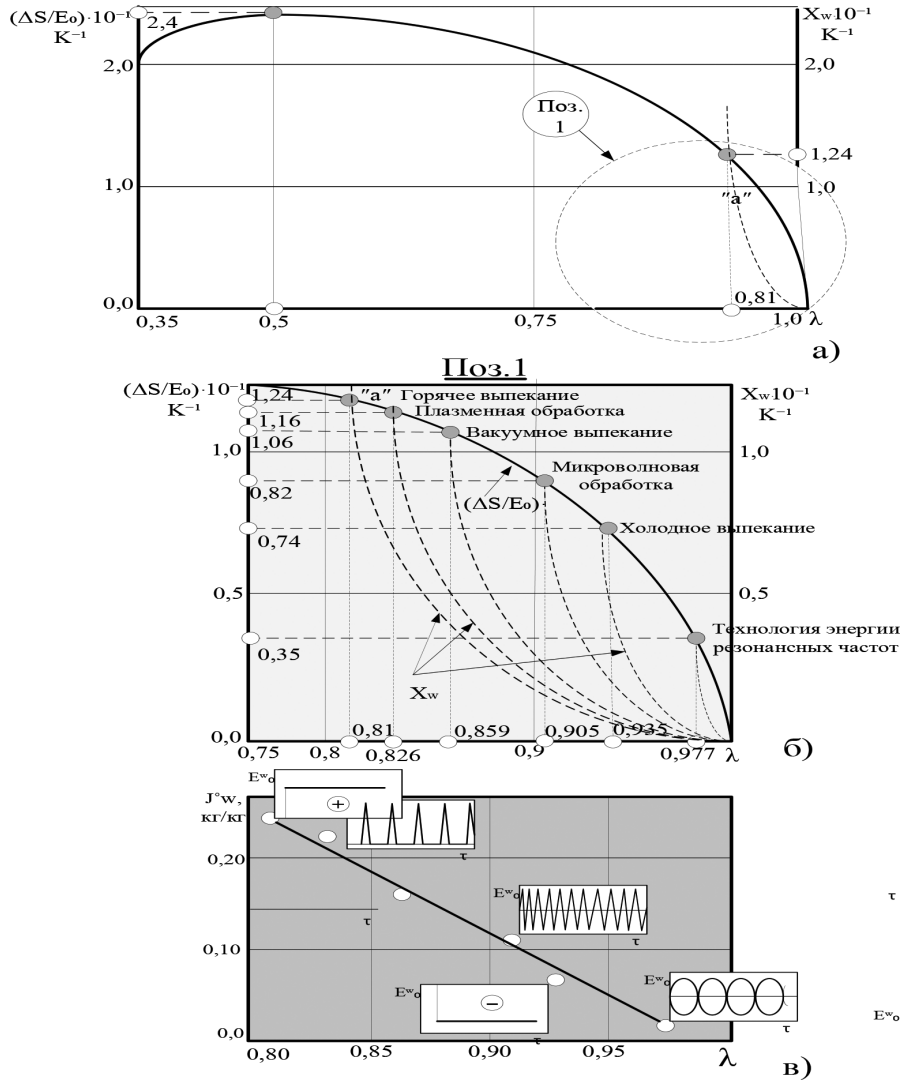


Рис. 1. Схема для розрахунку та розрахункові дані щодо теоретично обґрунтованого мінімуму утворення відходів у технологіях виробництва хліба. Тут: *а* – позиція теоретичного мінімуму відходів в технології виробництва хліба; *б* – розрахункові дані (п. 1) щодо виявлення фактичного відходоутворення для різних технологій виробництва хліба; *в* – залишкові відходи J_w^0 виробництва хліба при використанні модифікованої енергії E_0^w різних типів

Велике значення максимальної кількості зміни інтегральної ентропії (відносне значення $\frac{\Delta S^{\max}_{\lambda=0,5}}{E_0} = 0,24K^{-1}$ для $\lambda = 0,5$) на феноменологічній кривій Онсагера, при відносно невеликих значеннях цього показника в області отримання відходів (точка «а» на рис. 1), показує, що зміна стану термодинамічної рівноважності для тієї частини сировини J_w, з якої зазвичай виходять відходи, вимагають особливих умов для отримання додаткової зовнішньої енергії E_w, при яких термодинамічна сила не повинна перебільшувати значення $X_w \le 1,24 \cdot 10^{-1}\ K^{-1}$ для $\lambda \ge 0,81$, щоб не порушити умови отримання основної товарної продукції. Це може бути як модифікована базова енергія E_0^w, що здатна впливати й на компоненти сировини J_0, і на компоненти J_w, так і додаткова енергія спеціальної якості E_w, що здатна забезпечити або підвищені когезійні якості напівфабрикату, або виключити рівні можливості для температурної обробки різних компонентів вихідної сировини при яких $\lambda \to 1,0$.

Таким чином, висновок про утворення відходів в технологічному процесі виробництва хліба включає в себе наступне.

1. Матеріальні втрати в кількості 39 % сировини (див. таблицю 1) при $\lambda \ge 0,81$ – це харчові відходи, які практично повністю утилізуються поза технологічним процесом отримання хліба і не представляють додаткового інтересу. Вони включають компостування (80–90 % хлібних відходів), корми для тварин (60–70 %), виробництво біогазу (50–60 %), харчові добавки та продукти переробки (30–40 %), термічну утилізацію (10–15 %) та виробництво біопластику (5–8 %).

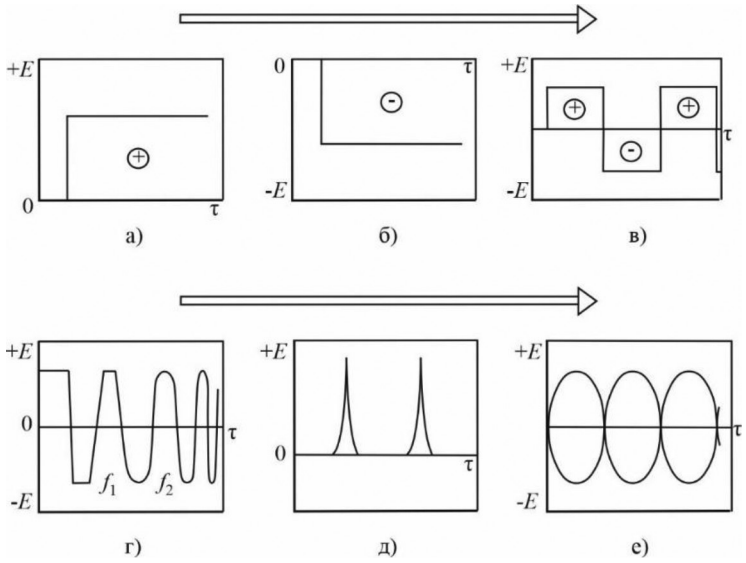


Рис. 2. Лінія розвитку характеристик енергетичного поля, що використовується в технологічному процесі: *а* – енергія постійного знаку; *б* – енергія зворотного знаку впливу; *в* – змінна енергія; *г* – високочастотне змінне енергетичне поле; *д* – імпульсне енергетичне поле; *е* – резонансне частотне поле

Таблиця 2

Розрахункові дані для аналізу ефективності технологій виробництва хліба щодо мінімізації відходів за умови постачання в систему модифікованої енергії E_0^w

№№ п/п	Найменування та особливості технологічного Процесу	Вид показника			
		T, K	λ., ед.	$\Delta S/E_0$ K^{-1}	ΔQ_w, кДж/кг
1	Гаряча випічка	473–523	0,812	$1{,}24 \cdot 10^{-1}$	850–1160
2	Холодна випічка	320–330	0,935	$0{,}74 \cdot 10^{-1}$	200–400
3	Вакуумна випічка	390–410	0,859	$1{,}06 \cdot 10^{-1}$	300–520
4	Мікрохвильова обробка	350–450	0,906	$0{,}82 \cdot 10^{-1}$	450–700
5	Плазмова обробка	800–950	0,826	$1{,}16 \cdot 10^{-1}$	800–1200
6	Технологія енергії резонансних частот	320–370	0,977	$0{,}35 \cdot 10^{-1}$	150–200

Таблиця 3

Спеціальні властивості джерел базової енергії резонансних виток в технологіях виробництва хліба (за даними Д. Міллєра, Р. Вільямса, С. Саблані – 2008–2019)

№№ п/п	Технологічні процеси в системі	Фізичні залежності
1	**Фізико-хімічні процеси.** При резонансному впливі зовнішнього поля частота молекулярних коливань в компонентах тіста (вода та ін.) збільшується, що призводить до пришвидшення цих процесів. резонансне поглинання енергії молекулами води прискорює її нагрівання і сприяє більш ефективному процесу клейстеризації крохмалю в тісті	$\frac{dC}{dt} = k_0 C^m,$ де C – концентрація речовини (наприклад, цукру, що утворюється при гідролізі крохмалю); k_0 – константа швидкості реакції; m – порядок реакції, який залежить від температури та ін. факторів (включаючи електромагнітн. вплив)
2	**Зміна реологічних властивостей.** Резонансні взаємодії дозволяють змінювати в'язкість тіста, його еластичність, текстуру. Частота молекулярних коливань в компонентах тіста збільшується, що призводить до пришвидшення цих процесів	$\eta = \eta_0(1 + \alpha H^2)$. де: η – резельтуюча в'язкість; η_0 – початкова в'язкість; α – константа, що характе-ризує чутливість в'язкості до магнітного полю; H – магнітна напруженість
3	**Резонансний нагрів.** Відноситься до резонансної взаємодії зовнішнього електромагнітного полю з молекулами води з тіста. При співпадінні частоти зовнішнього впливу з власною частотою ω = ω_0, система поглинає максимальну кількість енергії, що й призводить до нагріву	$\frac{d^2A}{dt^2} + 2\gamma\frac{dA}{dt} + \omega^2 A = F(t).$ тут: γ – коефіцієнт демпфування (пов'язаний з в'язкістю води та іншими характеристиками середовища), ω_0 – власна частота молекул води; A – амплітуда; $F(t)$ – зовнішня сила, пропорційна дії зовнішнього електромагн. поля

2. У номенклатурі енергетичних відходів переважають теплові втрати (36–58 % від енергії, що використовується), які неминучі в умовах переважно теплових процесів в технічних системах. Для того щоб мінімізувати їх в межах самого технологічного процесу, за принципом термодинамічної двоєдиності [4], необхідно ввести в технологічний процес або додаткове джерело енергії $E_w \sim 0{,}62E_0$, або модифіковану базову енергію E_0^w, Наприклад, за принципом, зазначеним в роботі [6] – по лінії розвитку основних модифікацій базової енергії – від зворотного знаку енергії до імпульсних і резонансних частотних полів (рис. 2).

Прикладом використання таких видів енергії в промисловому виробництві хліба можуть служити вже відомі технології (див. рис. 1, *б*), описані А. Ханом, Дж. Смитом, П. Тейлором, М. Джонсоном, М. Финчем (2001–2020).

Свого дослідження чекає технологія використання енергії резонансних частот щодо власних частотних властивостей сировини (борошна, вологи в тесті та ін.).

Застосування резонансних явищ, що виникають між компонентами сировини та модифікованою енергією, впливає на всі етапи технологічного процесу виробництва хліба (табл. 3). На відміну від інших методів, наприклад, індукційний впливає лише на етап випікання, а холодний – переважно на процеси бродіння та гідратації. Резонансний нагрів та обробка, зокрема, можуть використовуватись для прискорення желатинізації крохмалю, гідролізу та покращення реологічних властивостей тіста.

Використання резонансних явищ в системах виробництва хліба може бути дуже енергоефективним методом, враховуючи, що в цілому це маловідходне виробництво має основне джерело відходів у вигляді втраченої теплової енергії з втратами близько 1000 кДж/кг сировини, і навіть при використанні сучасних індукційних або інфрачервоних систем енергозабезпечення для спікання хліба – втрати досягають 400–700 кДж/кг сировини. У цьому ряду навіть розрахункові значення можливих втрат енергії при використанні резонансних технологій отримання випічки хліба можуть давати сумарні втрати тепла $\Delta Q_w \leq 120$ кДж/кг використовуваної сировини при значеннях $\lambda = 0{,}977$ і більш, при $\frac{\Delta S}{E_0} \leq 0{,}35 \cdot 10^{-1} K^{-1}$ (див. рис. 1, *в*), тобто наближення до теоретичного мінімуму утворення відходів у самому джерелі – технологічному процесі. Звісно, для такого розвиненого процесу, як виробництво хліба, існують способи модифікації основної енергії (теплової обробки), які можуть суттєво зменшити як матеріальні (органічні) відходи, так і втрати енергії. Сучасні джерела енергії, такі як низькотемпературні та високочастотні нагрівачі, а також імпульсні джерела, вже продемонстрували свою ефективність (див. рис. 1, *в*). Однак ресурси, приховані в самому технологічному процесі, дають надію на наближення до теоретичного мінімуму утворення відходів, включаючи теплові втрати.

Висновки

У сучасному хлібопеченні, хоча органічні відходи відносно невеликі та добре утилізуються, найбільшою проблемою залишаються значні втрати теплової енергії. Однак, згідно з теоретичним мінімумом утворення відходів, запропонований метод введення в технологічний процес модифікованої енергії резонансних коливань дозволяє не лише на порядок зменшити теплові втрати, а й завдяки резонансній взаємодії з молекулами води в сировині, знизити втрати органічних відходів до мінімально можливих 3 % від використаної сировини.

Список використаної літератури

1. Belitz, H.D., Grosch, W. and Schieberle, P. (2009) *Food Chemistry*. 4th Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1070 p.
2. Nielsen, S. S. (2017) *Food Analysis*, Department of Food Science Purdue University West Lafayette Indiana USA, Springer, 784 p.
3. Дробот В. І. (2024) *Технологія хлібопекарського виробництва*. Профкнига. Київ. 516 с.
4. Волошин В. С. (2024) *Відходи та термодинаміка*. Київ-Маріуполь, СПД Самченко, 80 с.
5. Волошин В. С. (2024) *Відходи та їх природа*. Київ-Маріуполь, СПД Самченко, 630 с.
6. Волошин В. С., Бурко В. А. (2024) *The Principle of Thermodynamic Duality as a Basis for the Creation of Industrial Waste in Technological Processes*. Scientific Aspects of Conserving and Restoring Natural Resources Under the Modern Development of Society. Scientific monograph. Riga, Latvia. Baltija Publishing. P. 32–53.

References

1. Belitz, H.D., Grosch, W. and Schieberle, P. (2009) *Food Chemistry*. 4th Edition, Springer-Verlag, Berlin, 1070 p.
2. Nielsen, S. S. (2017) *Food Analysis*, Department of Food Science Purdue University West Lafayette Indiana USA, Springer, 784 p.
3. Drobot V. I. (2024) *Technology of bakery production*. Professional book. Kyiv. 516 p.
4. Voloshyn V. S. (2024) *Waste and thermodynamics*. Kyiv-Mariupol, SPD Samchenko, 80 p.
5. Voloshyn V. S. (2024) *Waste and its nature*. Kyiv-Mariupol, SPD Samchenko, 630 p.
6. Voloshyn V. S., Burko V. A. (2024) *The Principle of Thermodynamic Duality as a Basis for the Creation of Industrial Waste in Technological Processes*. Scientific Aspects of Conserving and Restoring Natural Resources Under the Modern Development of Society. Scientific monograph. Riga, Latvia. Baltija Publishing. P. 32–53.

УДК 621.865.8:004.896+621.9.06 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.4

Н. О. ГОРОХІВСЬКИЙ
аспірант кафедри машинобудування
Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені Степана Ґжицького
ORCID: 0009-0004-8644-7053

В. М. ВЛАСОВЕЦЬ
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри машинобудування
Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені Степана Ґжицького
ORCID: 0000-0002-6657-6761

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ У РОБОТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ

Стаття присвячена дослідженню сучасних підходів до забезпечення якості обробки складнопрофільних деталей за допомогою роботизованих виробничих систем, зосереджуючись на інноваційному процесі інтелектуального роботизованого формування. В статті було розглянуто інтеграцію сенсорних систем, штучного інтелекту та зворотного зв'язку сил для адаптивної обробки деталей у реальному часі, що дозволяє досягти високої геометричної точності без додаткових етапів калібрування. У контексті переходу до інтелектуального виробництва, де зростає потреба у високоточній обробці складнопрофільних деталей для авіаційної, космічної та оборонної промисловостей, роботизовані виробничі системи набувають ключового значення завдяки їхній здатності забезпечувати гнучкість, адаптивність і високу якість обробки. Застосовувалися методи офлайн-програмування та алгоритми штучного інтелекту для планування траєкторій і кореляції між силами та геометрією. Метою дослідження є дослідження інтелектуальних процесів роботизованого формування для обробки складнопрофільних деталей, що забезпечує адаптивну реакцію на мінливість матеріальних властивостей. Наукова новизна полягає в обгрунтуванні використання інтелектуального процесу iRoRoFo, який інтегрує випрямлення на основі валків у цикл формування, використовуючи зворотний зв'язок сил для визначення геометрії в реальному часі без оптичних вимірювань. Запропоновано сенсорне рішення, що базується на алгоритмах штучного інтелекту, для обробки складних залежностей між силовими даними та геометричними параметрами, що є новаторським для роботизованих систем. Розроблений процес iRoRoFo продемонстрував здатність адаптивно коригувати геометрію деталей у реальному часі, забезпечуючи відповідність проектним параметрам. Використання силового зворотного зв'язку дозволило усунути потребу в складних оптичних системах, а інтеграція штучного інтелекту забезпечила точну кореляцію між виміряними силами та результуючою геометрією. Результати підтверджують перспективність підходу для обробки складнопрофільних деталей, відкриваючи можливості для масштабування в поточних промислових умовах.

Ключові слова: *роботизовані виробничі системи, складнопрофільні деталі, інтелектуальна обробка, офлайн-програмування, сенсорний контроль, адаптивне керування.*

N. O. HOROKHIVSKYI
Postgraduate Student at the Department of Mechanical Engineering
Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine
and Biotechnologies of Lviv
ORCID: 0009-0004-8644-7053

V. M. VLASOVETS
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Mechanical Engineering
Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine
and Biotechnologies of Lviv
ORCID: 0000-0002-6657-6761

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO QUALITY ASSURANCE OF COMPLEX PARTS IN ROBOTIC PRODUCTION SYSTEMS

The article is devoted to the study of modern approaches to ensuring the quality of processing of complex parts using robotic manufacturing systems, focusing on the innovative process of intelligent robotic molding. The article considered the integration of sensor systems, artificial intelligence and force feedback for adaptive processing of parts in real time, which allows achieving high geometric accuracy without additional calibration stages. In the context of the transition to intelligent manufacturing, where the need for high-precision processing of complex parts for the aviation, space and defense industries is growing, robotic manufacturing systems are gaining key importance due to their ability to provide flexibility, adaptability and high quality processing. Offline programming methods and artificial intelligence algorithms were used to plan trajectories and correlate forces and geometry. The aim of the study is to study intelligent processes of robotic molding for processing complex parts, which provides an adaptive response to the variability of material properties. The scientific novelty lies in the justification of the use of the intelligent iRoRoFo process, which integrates roll-based straightening into the forming cycle, using force feedback to determine the geometry in real time without optical measurements. A sensor solution based on artificial intelligence algorithms is proposed to process complex dependencies between force data and geometric parameters, which is innovative for robotic systems. The developed iRoRoFo process demonstrated the ability to adaptively adjust the geometry of parts in real time, ensuring compliance with design parameters. The use of force feedback eliminated the need for complex optical systems, and the integration of artificial intelligence provided an accurate correlation between the measured forces and the resulting geometry. The results confirm the promising approach for processing complex-profile parts, opening up opportunities for scaling in current industrial conditions.

Key words: *robotic manufacturing systems, complex parts, intelligent machining, offline programming, touch control, adaptive control.*

Постановка проблеми

Інтенсифікація розвитку машинобудівної галузі формує актуальне питання забезпечення високої якості механічної обробки складнопрофільних деталей, що потребує застосування передових технологій, здатних адаптуватися до складної геометрії та змінних умов виробництва. Із зростанням вимог до точності, функціональності й експлуатаційної надійності деталей, зумовлених високими стандартами сучасної інженерії, виникає необхідність у впровадженні нових технологічних підходів, які б забезпечували не лише стабільну якість продукції, але й ефективне використання матеріальних, часових та енергетичних ресурсів.

У традиційному виробничому процесі значна увага приділяється створенню масових партій деталей із незмінною геометрією, що передбачає використання важкого, часто дорогого обладнання та складних інструментів. Проте сучасні виклики, серед яких домінують зростання індивідуалізації продукції, високий рівень конкуренції та необхідність адаптації до мінливих вимог ринку, вимагають від підприємств гнучкості в організації механічної обробки деталей. У цьому контексті надзвичайно актуальним стає впровадження роботизованих виробничих систем, які здатні забезпечити належний рівень якості обробки, зберігаючи при цьому гнучкість, продуктивність та технологічну надійність процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодні певна частина навкових робіт Єпіфанова І. [2], Січіліано Б., Ш'явікко Л., Віллані Л., Оріоло Г. [15] акцентує увагу на перевагах візуального сервоуправління як одного з ефективних засобів адаптивного керування, що забезпечує підвищену гнучкість, точність позиціонування, стійкість до зовнішніх перешкод, зокрема шумів сенсорів та недоліків калібрування, а також дає змогу оперативно реагувати на зміни у навколишньому виробничому середовищі.

Попри ефективність зазначеної методики, її практичне застосування у сфері точного складання або обробки складнопрофільних деталей стикається з певними викликами, зокрема недостатнім рівнем точності позиціонування, що особливо критично при роботі з малими зазорами між компонентами. У зв'язку з цим, в публікаціях авторства Македон В., Байлова О. [3], Яковенко І., Пермяков О., Ільїн Д., Басова Є., Горбулик В. [6], було акцентовано увагу на важливості поєднання візуального керування з технологіями контролю сили контакту, як на основі класичних пасивних механізмів, таких як елементи з віддаленим центром податливості (RCC), так і завдяки впровадженню активних систем, зокрема імпедансного керування в декартовому просторі.

Дослідницькі роботи Джао С., Ван Х., Чжан С. [10], Райлат М., Франко Е., Елмоакет Х., Алмтірін Н., Аль-Рефаї Г. [14] пропонують широкий спектр стратегій вирівнювання та складання деталей, що варіюються від простих, але ефективних алгоритмів без моделі, до складних рішень із використанням онлайн-моніторингу контактного стану. В контексті обробки складнопрофільних деталей, де кожна поверхня потребує індивідуального підходу, значна увага приділяється офлайн-плануванню, яке дозволяє, на основі попереднього аналізу CAD-моделі, згенерувати набір оптимізованих траєкторій та параметрів відповідності. Певна маса наукових праць, як то Новіков Ф. [5] та Лікардо Дж. Т., Дом'ян М., Ореховачки Т. [11] фокусується на дослідженні інтегрованих підходів, де машинне бачення поєднується зі зворотним силовим зв'язком та адаптивними алгоритмами, що сприяє підвищенню точності, стабільності й ефективності при виконанні обробних та складальних операцій.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – дослідити та обґрунтувати сучасні підходи до покращення якості обробки складнопрофільних деталей роботизованими системами, зокрема через інтелектуальні алгоритми, сенсорний контроль, офлайн-програмування та адаптацію до умов цифрової промисловості.

Викладення основного матеріалу дослідження

В умовах переходу до інтелектуального виробництва роботизовані системи механічної обробки демонструють новий рівень технологічної досконалості, що досягається завдяки інтеграції промислових роботів, багатоканальних сенсорних модулів, машинного навчання та хмарних аналітичних платформ. Такі системи здатні самостійно сприймати інформацію про навколишнє виробниче середовище, оцінювати параметри обробки в реальному часі, прогнозувати зміну технологічних умов та адаптувати траєкторії обробки без втручання оператора [1, с. 50]. Виділені позиції відкривають нові перспективи для обробки складнопрофільних деталей, де традиційні методи втрачають свою ефективність через обмеження у гнучкості, повторюваності або точності (табл. 1).

Таблиця 1

Перспективні технології і процеси роботизованої обробки складнопрофільних деталей

Технологія/Процес	Опис	Перспективи розвитку
1. Інтелектуальне програмування	Використання ПЗ для автоматизованого створення програм обробки складних деталей	Розробка адаптивного ПЗ із застосуванням ШІ для оптимізації траєкторій і зменшення часу програмування
2. Точне калібрування	Забезпечення високої точності позиціонування роботів через калібрування систем	Удосконалення методів автоматичного калібрування з використанням сенсорів і зовнішніх систем відстеження
3. Планування траєкторії	Оптимізація руху інструменту для підвищення ефективності обробки	Впровадження технологій обробки з двома роботами та планування на основі динамічної жорсткості
4. Керування силою обробки	Регулювання зусиль для забезпечення якості поверхні та мінімізації вібрацій	Розвиток адаптивного керування імпедансом для фінішної обробки складних деталей
5. Компенсація вібрацій	Зменшення регенеративних і модальних вібрацій під час обробки	Створення детальних моделей вібрацій із модальним зв'язком і стратегій активного поглинання вібрацій
6. Мобільна робототехніка	Використання мобільних роботів для обробки великих деталей	Інтеграція SLAM і співпраця кількох роботів для обробки складних конструкцій
7. Високоточне шліфування	Роботизоване шліфування та полірування великих деталей із контролем припуску	Розвиток онлайн-вимірювань і програмного забезпечення для обробки хмар точок із слабкими ознаками
8. Оптимізація жорсткості	Посилення технологічної системи через допоміжну підтримку та позиціонування	Впровадження методів прогнозування помилок і компенсації на основі сенсорів у реальному часі
9. Адитивне та субтрактивне виробництво	Інтеграція адитивних і субтрактивних процесів у роботизованих системах	Розробка реконфігурованих функціональних блоків для обробки тонкостінних деталей
10. Моніторинг у реальному часі	Контроль стану обробки та компенсація відхилень під час роботи	Впровадження архітектури передачі даних і демпфіруючого обладнання для комплексної оптимізації

Джерело: сформовано на основі [7, 16].

У цьому контексті все більшого значення набуває використання роботизованих виробничих систем, які демонструють високу здатність до масштабування, простоту реконфігурації та інтеграцію з інтелектуальними технологіями управління, зокрема в умовах багатороботної співпраці. Саме роботизовані системи здатні забезпечити ефективну координацію декількох виконавчих механізмів у межах одного технологічного процесу, що відкриває перспективи для створення комплексних платформ, здатних одночасно виконувати функції обробки, вимірювання, моніторингу та автоматичного контролю якості (рис. 1).



Рис. 1. Інтелектуальна система контролю якості обробки складнопрофільних деталей із використанням роботизованої камери IntACom [9]

Особливе значення роботизовані системи набувають у галузях, де домінує виготовлення деталей з високими вимогами до геометричної точності та чистоти поверхні при одночасній потребі в індивідуалізованому підході до кожного виробу як, наприклад, в авіаційній, космічній або оборонній промисловості. У таких випадках традиційні методи механічної обробки не завжди спроможні забезпечити належний рівень якості, особливо при наявності нерівномірних припусків, складних контурів або нестандартних форм. Інтеграція технологій комп'ютерного зору, сенсорних систем вимірювання сили та машинного навчання у структуру роботизованих виробничих комплексів дозволяє створювати інтелектуальні системи, які здатні виконувати обробку в автономному режимі, із самостійним визначенням параметрів, плануванням траєкторії, оцінкою результатів і коригуванням дій у реальному часі [12, с. 52].

Наголос у сучасних дослідженнях, присвячених обробці складнопрофільних деталей за допомогою роботизованих систем, зміщується у бік забезпечення високого рівня інтелектуалізації, здатності до самонавчання та швидкої адаптації до змінних виробничих умов. Однак, поряд із перевагами, такі системи все ще стикаються з низкою технологічних викликів, зокрема пов'язаних із недостатньою жорсткістю конструкції, залежністю динамічних характеристик від положення в просторі та труднощами стабілізації траєкторії при обробці деталей складної геометрії. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу до оптимізації параметрів конструкції роботів, удосконалення алгоритмів управління рухом, точного калібрування систем, а також застосування новітніх методів прогнозування та компенсації коливань, які виникають у процесі обробки [4, с. 81]. У процесі забезпечення високої точності та якості обробки складнопрофільних деталей важливою передумовою ефективної роботи роботизованих виробничих систем є точне планування траєкторій руху виконавчих механізмів, що реалізується, зокрема, під час попередньої перевірки геометрії поверхонь. Хоча однією з можливих процедур налаштування шляхів сканування є використання навчального пульта керування роботом, такий підхід виявляється надзвичайно трудомістким і неефективним при роботі з деталями складної геометричної конфігурації. Натомість застосування офлайн-програмування (OLP) дозволяє значно прискорити цей процес, мінімізувати помилки, а також досягти вищого ступеня автоматизації та повторюваності виробничих дій (рис. 2).

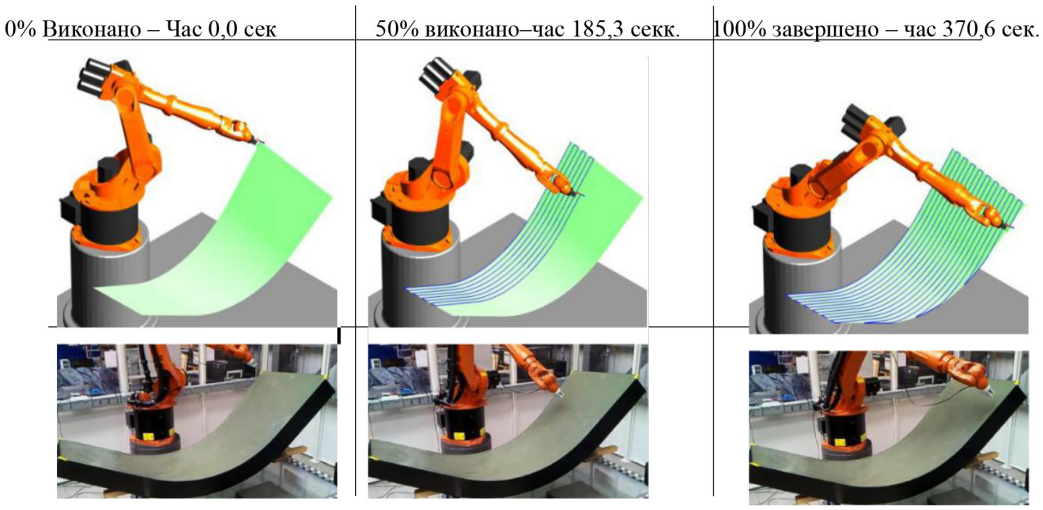


Рис. 2. Віртуальна роботизована комірка з деталлю складної геометрії та згенерованими траєкторіями обробки [8]

Оптимальним варіантом вважається застосування програмних рішень, які забезпечують інтеграцію CAD-моделі деталі у віртуальне середовище для визначення зон контролю, після чого відповідне програмне забезпечення автоматично формує оптимальні траєкторії руху для інструментів або сенсорів роботизованої системи. Реалізація офлайн-програмування може здійснюватися як за допомогою вже наявного комерційного ПЗ для моделювання та програмування, так і через створення власних алгоритмів побудови шляхів з урахуванням специфіки геометрії деталей. Такі цифрові платформи дозволяють сформувати віртуальну виробничу комірку, яка включає в себе як роботизовані маніпулятори, так і модель деталі, що підлягає обробці [17].

Головним функціональним компонентом програмного забезпечення є можливість імпортувати геометричні дані в форматі STL, після чого запускається процедура обробки CAD-моделі, що передбачає перенесення координатної сітки деталі у простір сканування та її узгодження з системою координат скануючих траєкторій. Завантажені 3D-моделі далі проходять етап сегментації поверхні, в ході якого система ідентифікує окремі поверхні деталі, об'єднуючи грані з близькими координатами в логічні групи (рис. 3).

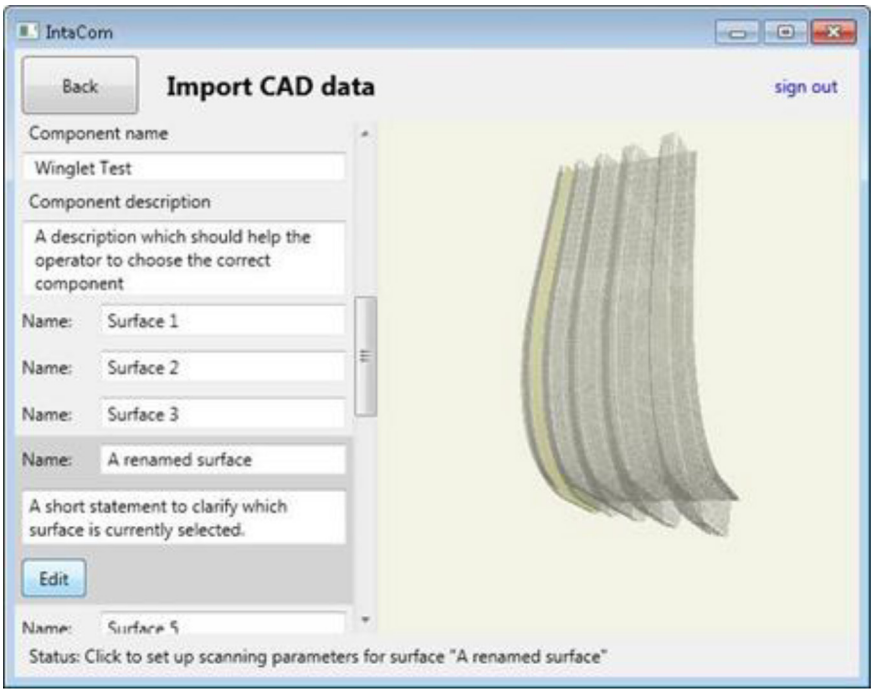


Рис. 3. Інтерфейс імпорту геометричних даних CAD-моделі для побудови траєкторій обробки складнопрофільної деталі [8]

Подібний варіант поділу досягається за допомогою двофазного алгоритму: на першому етапі формується індексований список унікальних координат вузлів та їх прив'язка до граней, а на другому вже виконується рекурсивна побудова груп граней, пов'язаних через спільні вузли. В результаті цього процесу формується структурована геометрична модель із чітко визначеними поверхнями, кожна з яких може бути використана як окрема область для проведення сканування або подальшої механічної обробки [5, с. 167]. Таке технічне рішення формує засади для підвищення якості сканування поверхонь, і також ще значно оптимізувати час на підготовку технологічних операцій, що особливо важливо в умовах роботи з індивідуалізованими або дрібносерійними замовленнями.

Подальший збір технологічних даних реалізується шляхом синхронізованої взаємодії між координованими сигналами зворотного зв'язку від роботизованих виконавчих пристроїв та інформацією, отриманою від сенсорів ультразвукового контролю. Злагоджена робота цих джерел інформації вимагає стабільної та високопродуктивної обчислювальної платформи, оскільки будь-яка затримка у передачі сигналів може призвести до втрати ділянок даних, а отже і до зниження загальної якості обробки й контролю [11].

У контексті забезпечення якості обробки складнопрофільних деталей при використанні роботитів, певну увагу приділемо адаптації технологічних процесів до мінливості властивостей матеріалів, зокрема профілю залишкових напруг у металопрокатних заготовках, який може значно варіюватися від однієї деталі до іншої і є складним для прогнозування до початку обробки. Для вирішення цієї проблеми розробляється інноваційний процес інтелектуального роботизованого формування (iRoRoFo), який передбачає здатність системи оперативно реагувати на поведінку матеріалу конкретної деталі в реальному часі, що дозволяє досягти високої точності геометричних параметрів без необхідності додаткових етапів калібрування (рис. 4).

На відміну від традиційних методів формування валками, які зазвичай базуються на жорстко фіксованих параметрах і потребують завершального геометричного виправлення, роботизовані системи з високим ступенем свободи вимагають розробки стратегій динамічної компенсації відхилень безпосередньо під час процесу, що забезпечує інтеграцію етапу випрямлення на основі валків у загальний цикл формування, спрямований на досягнення кінцевої геометрії, визначеної проектними кресленнями.

Ключовою особливістю цього підходу є використання алгоритмів штучного інтелекту для обробки складних даних, зокрема для кореляції між виміряними силами та результуючою геометрією деталі, що є важливим через неможливість прямого аналітичного розрахунку таких залежностей. У рамках дослідження розроблено сенсорне рішення, яке базується на зворотному зв'язку сил, отриманих від роботизованої системи, для визначення геометрії деталі на будь-якому етапі виробництва без переривання процесу та без використання складних оптичних вимірювальних систем [18]. Експерименти проводилися на тонких сталевих листах із заданою синусоїдальною геометрією, що дозволило оцінити ефективність запропонованого методу.

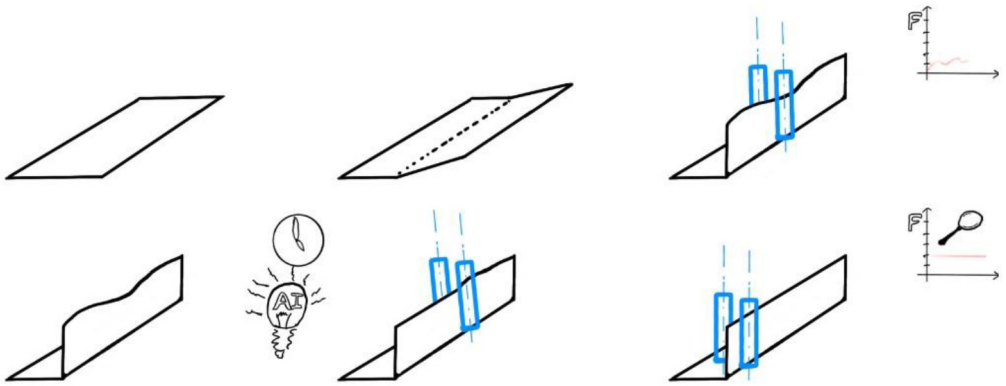


Рис. 4. Етапи реалізації iRoRoFo-процесу в системі роботизованої обробки складнопрофільних деталей [15]

У процесі iRoRoFo формування листового металу здійснюється за допомогою роботизованого кінцевого ефектора, оснащеного двома конічними валками, які забезпечують поступове формування деталі, тоді як сили, що діють на фланець робота, безперервно реєструються для подальшого аналізу. Після завершення чергового етапу формування система розраховує необхідні коригування геометрії на основі зібраних даних, які застосовуються на фінальному кроці обробки, що дозволяє досягти високої відповідності цільовим параметрам (рис. 5) [10].

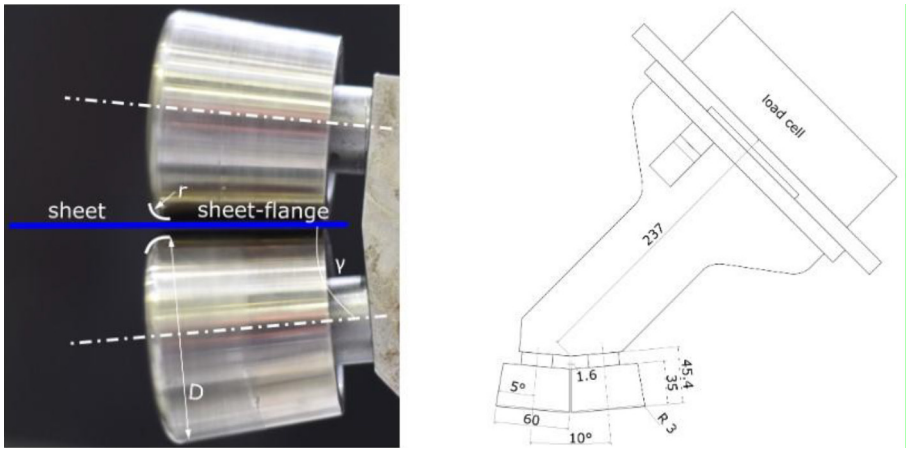


Рис. 5. Структурна схема роботизованого кінцевого ефектора для високоточної обробки складнопрофільних деталей [13]

Для розробки цього методу геометрія деталі вимірюється зовнішньою системою, яка слугує основою для створення сенсорного рішення, що спирається виключно на силові дані. Також, визначимо, що для забезпечення якості обробки складнопрофільних деталей за допомогою роботизованих виробничих систем особливу увагу привертають технології автоматизованого ультразвукового контролю, що дозволяють здійснювати високоточну діагностику внутрішньої структури матеріалів під час або після механічної обробки. Серед існуючих методів одним із найбільш базових є технологія з використанням спеціального тримача у вигляді виделки, на кінцях якої закріплено ультразвукові випромінювачі із розпилювальною системою, що забезпечує зволоження зони контролю. Для контролю складнопрофільних поверхонь, що мають просторово криволінійну структуру, виникає потреба у застосуванні більш складних систем, які передбачають синхронізовану взаємодію щонайменше двох роботизованих маніпуляторів. У цьому випадку один робот виконує функцію носія передавального ультразвукового зонда, а інший – приймального, при цьому обидва пристрої повинні рухатися по заданих траєкторіях, розташованих точно один навпроти одного (рис. 6) [19, с. 31–32].

Для забезпечення коректного проходження ультразвукових хвиль осі передавального і приймального зондових систем мають бути не лише січними, а й максимально співвісними, що потребує надзвичайно точного узгодження положення обох роботів. Залежно від типорозміру та конструкційних характеристик роботизованих маніпуляторів, похибка допустимого відхилення у позиціонуванні зазвичай коливається в межах одиниць міліметра, а допустимий кутовий розбій у коаксіальності не повинен перевищувати декількох градусів.

Таким чином, сучасні підходи до забезпечення якості обробки складнопрофільних деталей передбачають тісну інтеграцію цифрових, сенсорних та робототехнічних технологій у єдину інтелектуальну систему, здатну адаптивно та надійно реалізовувати складні виробничі завдання.



Рис. 6. Роботизована клітина з синхронізованими маніпуляторами для неруйнівного ультразвукового контролю складнопрофільних деталей [9]

Висновки

Досліджено функціональні можливості інтеграції промислових роботів, систем комп'ютерного бачення, сенсорних модулів (зокрема ультразвукових і силовимірювальних датчиків) та алгоритмів машинного навчання в єдину інтелектуальну систему. Ця система здатна безперервно аналізувати параметри технологічного процесу, передбачати його зміни та автоматично коригувати траєкторії руху інструментів без втручання оператора. Проаналізовано перспективні напрями розвитку ключових технологій, спрямованих на підвищення якості обробки деталей складної форми. Особлива увага приділена таким аспектам, як точне калібрування, планування траєкторій, адаптивне регулювання зусиль, компенсація вібрацій, а також застосування мобільних роботів і систем моніторингу в реальному часі. Оцінено ефективність поєднання офлайн-програмування з CAD-даними як основного інструменту для швидкої перебудови обробної системи в умовах серійно-одиничної чи індивідуалізованої виробництво.

Розроблено концепцію інтелектуального формування iRoRoFo, яка дозволяє в режимі реального часу адаптувати зусилля і параметри обробки до особливостей конкретної деталі, без потреби у попередньому калібруванні. Це значно підвищує точність і стабільність отриманих геометричних характеристик без застосування складних оптичних систем контролю. Запропоновано нове сенсорне рішення, засноване на аналізі силового зворотного зв'язку, що дозволяє визначати форму деталі прямо в процесі обробки, оперативно коригувати технологічні параметри та уникати втрат точності, викликаних зміною залишкових напружень або неточністю позиціонування. Також запропоновано оптимізовану архітектуру взаємодії кількох роботизованих маніпуляторів, які одночасно виконують ультразвуковий неруйнівний контроль поверхонь складного профілю. При цьому забезпечується висока точність співвісності ультразвукових зондів та мінімально допустиме відхилення в міліметровому й кутовому діапазонах.

Список використаної літератури

1. Громовий О. А., Виговський Г. М., Балицька Н. О. Шляхи удосконалення процесу обробки плоских поверхонь деталей фрезеруванням. *Технічна інженерія*. 2020. № 2(86). С. 48–53. DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-48-53

2. Єпіфанова І. М. Вплив використання сучасних технологій на ефективність діяльності машинобудівних підприємств країни. *Економіка та суспільство*. 2025. № 72. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-7

3. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Випуск 47. С. 16-26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3

4. Македон В. В., Холод О. Г., Ярмоленко Л. І. Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. *Академічний огляд*. 2023. № 2(59). С. 75–89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5

5. Новіков Ф. В. Технологічне забезпечення високоякісної та високоточної механічної обробки : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2024. 460 с.

6. Яковенко І. Є., Пермяков О. А., Ільїн Д. О., Басова Є. В., Горбулик В. І. До проблем автоматизації дільниці механічної обробки деталей з полістиролу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні*. 2024. № 1(9). С. 30–39. DOI: https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.1(9).03

7. Abdolmohammadi T., Richter-Trummer V., Ahrens A., Richter K., Alibrahim A., Werner M. Virtual sensor-based geometry prediction of complex sheet metal parts formed by robotic rollforming. *Robotics*. 2023. Vol. 12, no. 2. p. 33. https://doi.org/10.3390/robotics12020033

8. Campilho R. D. S. G., Silva F. J. G. Industrial process improvement by automation and robotics. *Machines*. 2023. Vol. 11, no. 11. p. 1011. https://doi.org/10.3390/machines11111011

9. Cooper I., Nicholson I., Yan D., Wright B., Liaptsis D., Mineo C. Development of a fast inspection system for complex composite structures – The IntACom project. *Proceedings of the 5th International Symposium on NDT in Aerospace. 2013. November 13–15*. Singapore. https://www.ndt.net/article/aero2013/content/papers/45_Cooper.pdf

10. Jiao S., Wang H., Xia L., Zhang S. Research on trajectory planning of 6-DOF cutting-robot in machining complex surface. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 220. p. 06003. https://doi.org/10.1051/matecconf/201822006003

11. Licardo J. T., Domjan M., Orehovački T. Intelligent robotics–A systematic review of emerging technologies and trends. *Electronics*. 2024. Vol. 13, no. 3. p. 542. https://doi.org/10.3390/electronics13030542

12. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunenko N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47–57. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796

13. Papavasileiou A., Michalos G., Makris S. Quality control in manufacturing – review and challenges on robotic applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2024. Vol. 38, no. 1. p. 79–115. https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2314789

14. Ryalat M., Franco E., Elmoaqet H., Almtireen N., Al-Refai G. The integration of advanced mechatronic systems into Industry 4.0 for smart manufacturing. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 19. p. 8504. https://doi.org/10.3390/su16198504

15. Schulz A., Queißer J. F., Ishihara H., Asada M. Transfer learning of complex motor skills on the humanoid robot Affetto. *Proceedings of the 2018 Joint IEEE 8th International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)*. 2018. p. 72–77. https://doi.org/10.1109/DEVLRN.2018.8761031

16. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. *London: Springer*, 2010. 181 p. https://people.disim.univaq.it/~costanzo.manes/EDU_stuff/Robotics_Modelling,%20Planning%20and%20Control_Sciavicco_extract.pdf

17. Younis H., Bwaliez O. M., Garibeh M. H., Sundarakani B. Empirical study of robotic systems implementation to corporate performance in manufacturing sector. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2024. Advance online publication. https://doi.org/10.1108/IJPPM-02-2024-0070

18. Zhen M., Lizhe Q., Yunquan S., Min X. Research on robotic measurement path planning for complex surface workpieces. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1820, no. 1. p. 012072. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012072

19. Zhu Z., Tang X., Chen C., Peng F., Yan R., Zhou L., Li Z., Wu J. High precision and efficiency robotic milling of complex parts: Challenges, approaches and trends. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021. Vol. 35, no. 2. p. 22–46. https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.12.030

References

1. Gromovyi O. A., Vyhovskyi H. M., Balytska N. O. (2020). Shliakhy udoskonalennia protsesu obrobky ploskikh poverkhon' detaley frezeruvanniam [Ways to improve the process of flat surface machining by milling]. *Tekhnichna inzheneriia*, no. 2(86), pp. 48–53. https://doi.org/10.26642/ten-2020-2(86)-48-53 [in Ukrainian].

2. Epifanova I. M. (2025). Vplyv vykorystannia suchasnykh tekhnolohii na efektyvnist' diial'nosti mashynobudivnykh pidpryiemstv krainy [Impact of the use of modern technologies on the efficiency of the activities of the country's engineering enterprises]. *Ekonomika ta suspilstvo, no. 72*. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-7 [in Ukrainian].

3. Makedon V. V., Bailova O. O. (2023). Planuvannya i orhanizatsiya vprovadzhennya syfrovykh tekhnolohiy v diyal′nist′ promyslovykh pidpryyemstv [Planning and organizing the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises]. *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Economic Sciences"*, no. 47, pp. 16–26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3 [in Ukrainian].

4. Makedon V. V., Kholod O. H., Yarmolenko L. I. (2023). Model′ otsinky konkurentospromozhnosti vysokotekhnolohichnykh pidpryyemstv na zasadakh formuvannya klyuchovykh kompetentsiy [The model of assessing the competitiveness of high-tech enterprises based on the formation of key competencies]. *Akademichnyy ohlyad*, no. 2(59), pp. 75–89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5 [in Ukrainian].

5. Novikov F. V. (2024). Tekhnolohichne zabezpechennia vysokoiakisnoi ta vysokotochnoi mekhanichnoi obrobky: monohrafiia [Technological support of high-quality and high-precision mechanical processing: monograph]. Dnipro : LIRA. [in Ukrainian].

6. Yakovenko I. Ye., Permiakov O. A., Il'in D. O., Basova Ye. V., Horbulyk V. I. (2024). Do problem avtomatyzatsii dilnytsi mekhanichnoi obrobky detaley z polistyrolu [On the problems of automation of the mechanical processing area of polystyrene parts]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni, no. 1*(9), pp. 30–39. https://doi.org/10.20998/2079-004X.2024.1(9).03. [in Ukrainian].

7. Abdolmohammadi T., Richter-Trummer V., Ahrens A., Richter K., Alibrahim A., & Werner M. (2023). Virtual sensor-based geometry prediction of complex sheet metal parts formed by robotic rollforming. *Robotics, no. 12*(2), pp. 33. https://doi.org/10.3390/robotics12020033

8. Campilho R. D. S. G., & Silva F. J. G. (2023). Industrial process improvement by automation and robotics. *Machines*, no. 11(11), pp. 1011. https://doi.org/10.3390/machines11111011

9. Cooper I., Nicholson I., Yan D., Wright B., Liaptsis D., & Mineo C. (2013). Development of a fast inspection system for complex composite structures – The IntACom project. *In Proceedings of the 5th International Symposium on NDT in Aerospace (November 13–15, Singapore)*. https://www.ndt.net/article/aero2013/content/papers/45_Cooper.pdf

10. Jiao S., Wang H., Xia L., & Zhang S. (2018). Research on trajectory planning of 6-DOF cutting-robot in machining complex surface. *MATEC Web of Conferences*, no. 220, pp. 06003. https://doi.org/10.1051/matecconf/201822006003

11. Licardo J. T., Domjan M., & Orehovački T. (2024). Intelligent robotics – A systematic review of emerging technologies and trends. *Electronics*, no. 13(3), pp. 542. https://doi.org/10.3390/electronics13030542

12. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunenko N., Mykhailenko O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no 2(13(128)), pp. 47-57. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796

13. Papavasileiou A., Michalos G., & Makris S. (2024). Quality control in manufacturing – review and challenges on robotic applications. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, no. 38(1), pp. 79–115. https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2314789

14. Ryalat M., Franco E., Elmoaqet H., Almtireen N., & Al-Refai G. (2024). The integration of advanced mechatronic systems into Industry 4.0 for smart manufacturing. *Sustainability, no. 16*(19), pp. 8504. https://doi.org/10.3390/su16198504

15. Schulz A., Queißer J. F., Ishihara H., & Asada M. (2018). Transfer learning of complex motor skills on the humanoid robot Affetto. In Proceedings of the 2018 *Joint IEEE 8th International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob)* (pp. 72–77). IEEE. https://doi.org/10.1109/DEVLRN.2018.8761031

16. Siciliano B., Sciavicco L., Villani, L., & Oriolo G. (2010). Robotics: Modelling, Planning and Control. *Springer London*. https://people.disim.univaq.it/~costanzo.manes/EDU_stuff/Robotics_Modelling,%20Planning%20and%20Control_Sciavicco_extract.pdf

17. Younis H., Bwaliez O. M., Garibeh M. H., & Sundarakani B. (2024). Empirical study of robotic systems implementation to corporate performance in manufacturing sector. International *Journal of Productivity and Performance Management*, Advance online publication. https://doi.org/10.1108/IJPPM-02-2024-0070

18. Zhen M., Lizhe Q., Yunquan S., & Min,X. (2021). Research on robotic measurement path planning for complex surface workpieces. *Journal of Physics: Conference Series*, no. 1820(1), pp. 012072. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012072

19. Zhu Z., Tang X., Chen C., Peng F., Yan R., Zhou L., Li Z., & Wu J. (2021). High precision and efficiency robotic milling of complex parts: Challenges, approaches and trends. *Chinese Journal of Aeronautics*, no. 35(2), pp. 22–46. https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.12.030

УДК 675.024 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.5

А. Г. ДАНИЛКОВИЧ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-5707-0419

О. А. ОХМАТ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-0927-8706

ХРОМОЩАДНЕ ДУБЛЕННЯ ШКІРЯНОГО НАПІВФАБРИКАТУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛАСТИЧНОЇ ШКІРИ

Досліджено процеси хромощадного дублення недвоєного напівфабрикату з сировини великої рогатої худоби товщиною 3,8–4,0 мм і додублювання хромового напівфабрикату товщиною 1,3–1,4 мм з використанням алкілкарбоксиетаноламінів аліфатичних кислот фракції C_{7-9}. Процес дублення недвоєного напівфабрикату завдяки використанню поверхнево-активного алкілкарбоксиетаноламіну дає можливість отримати шкіряний напівфабрикат з вищою пошаровою рівномірністю розподілу сполук хрому. При цьому витрати хромового дубителя зменшено в 1,7 рази порівняно з існуючою технологією. Встановлено вплив зміни структури недвоєного і двоєного напівфабрикату на особливості взаємодії основних сполук хрому з колагеном дерми в присутності поверхнево-активного алкілкарбоксиетаноламіну. Блокування молекулами алкілкарбоксиетаноламіну карбоксильних груп колагену сприяє дифузії в дерму напівфабрикату сполук хрому та їх взаємодії з молекулами алкілкарбоксиетаноламіну. У подальшому атоми хрому взаємодіють з йонізованими карбоксильними групами колагену з утворенням внутрішньо координаційних ковалентних зв'язків хром–колаген.

При додублюванні менш активні пептидні групи колагену вступають у взаємодію з комплексними сполуками хрому вищої основності. При цьому підвищується ступінь структурування колагену напівфабрикату, його міцність і термостійкість.

Порівняльний аналіз технологій свідчить про переваги процесів дублення та додублювання перед існуючими, що полягають у менших витратах екологічно небезпечних сполук хрому, води та скороченні тривалості відповідно в 1,7; 1,4 і 2,1–2,2 рази. Це дає підстави вважати, що розроблені дубильно-додублювальні процеси є хромощадними і можуть бути екологічно орієнтованими та ефективно використовуватись при розробленні технологій виготовлення еластичних шкіряних матеріалів з інших видів сировини. Вказані технології можуть бути реалізовані у виробництві із застосуванням типового обладнання для рідинних обробок.

Ключові слова: *недвоєний шкіряний напівфабрикат, хромове дублення, додублювання, алкілкарбоксиетаноламіни, витрати сполук хрому, фізико-хімічні властивості, обладнання шкіряного виробництва.*

A. H. DANYLKOVYCH
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-5707-0419

O. A. OKHMAT
PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0003-0927-8706

CHROMIUM-SAVING TANNING OF LEATHER SEMI-FINISHED PRODUCT FOR ELASTIC LEATHER MANUFACTURING

The processes of chromium-saving tanning of non-split semi-finished product from cattle raw material with a thickness of 3.8–4.0 mm and retanning of chromium semi-finished product with a thickness of 1.3–1.4 mm using alkylcarboxyethanoamines of aliphatic acids of the C_{7-9} fraction were investigated. The tanning process of the non-split semi-finished product, due to the use of a surface-active alkylcarboxyethanoamine, makes it possible to obtain a leather semi-finished product with a higher layer-by-layer uniformity of chromium compound distribution. At the same time,

the consumption of chromium tanning agent is reduced by 1.7 times compared to the existing technology. The influence of changes in the structure of the non-split and split semi-finished product on the peculiarities of the interaction of the main chromium compounds with dermal collagen in the presence of surface-active alkylcarboxyethanoamine was established. The blocking of carboxyl groups of collagen by alkylcarboxyethanoamine molecules promotes the diffusion of chromium compounds into the derma of the semi-finished product and their interaction with alkylcarboxyethanoamine molecules. Subsequently, chromium atoms interact with ionised carboxyl groups of collagen to form intramolecular coordination covalent chromium–collagen bonds.

During retanning, less active peptide groups of collagen interact with complex chromium compounds of higher basicity. This increases the degree of collagen structure formation of the semi-finished product, its strength, and heat resistance.

A comparative analysis of technologies indicates the advantages of the tanning and retanning processes over existing ones, which consist of lower consumption of environmentally hazardous chromium compounds, water, and a reduction in duration by 1.7, 1.4, and 2.1–2.2 times, respectively. This suggests that the developed tanning and retanning processes are chromium-saving and can be environmentally oriented and effectively used in the development of technologies for the production of elastic leather materials from other types of raw materials. These technologies can be implemented in production using typical equipment for liquid processes.

Key words: *non-split leather semi-finished product, chromium tanning, retanning, alkylcarboxyethanoamines, consumption of chromium compounds, physical and chemical properties, leather production equipment.*

Постановка проблеми

При розробленні нових та удосконаленні діючих технологій виробництва шкіри суттєве значення має врахування їх багатостадійності, тривалості та використання значної кількості хімічних реагентів у тому числі екологічно небезпечних сполук хрому. Однією з основних стадій формування шкіряного матеріалу є його дублення, оскільки на цій стадії відбуваються глибокі структурні перетворення колагену дерми і найбільш повно проявляється його хімічна активність при взаємодії зі сполуками хрому та іншими реагентами. Застосування хромового дубителя обумовлено необхідністю отримання еластичних шкір з комплексом високих фізико-механічних властивостей. У зв'язку з цим можна вважати перспективними технологічні процеси зі зменшенням витрат сполук хрому при отриманні якісних шкіряних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз науково-технічної літератури з технології виготовлення шкіряних матеріалів свідчить про різні варіанти виключення чи скорочення витрат використовуваних екологічно небезпечних реагентів. Так у роботі [1] досліджено процес безхромового дублення шкіряного напівфабрикату завдяки використанню поліамінового естеру з кінцевими епоксидними групами на стадії пікелювання і сполук алюмінію на стадії дублення. Така технологія сприяла ефективному виконанню подальших процесів рідинного оздоблювання та отриманню хімічно стійкої шкіри. У роботах [2–4] наведені результати дослідження впливу полімерів на основі малеїнової та акрилової кислот відповідно на полімер-титанове і полімер-хромове дублення шкіряного напівфабрикату з овчини. У роботі [2] автори дослідили вплив полімеру на основі малеїнової кислоти на процес дублення шкіряного напівфабрикату сполуками титану. При цьому зменшується вміст сполук титану у відпрацьованих розчинах у два рази. Встановлено, що таке безхромове дублення дає змогу отримувати шкіряний матеріал з високими гігієнічними і фізико-механічними властивостями. Авторами роботи [3] досліджено використання похідної малеїнової кислоти також і при хромовому дубленні напівфабрикату овчини для виготовлення одягової шкіри. Встановлено зменшення витрат дубителя на 25 %, скорочення тривалості дублення у три рази та зниження вмісту Cr_2O_3 у відпрацьованому розчині на 27,9 %. Водночас отримується напівфабрикат Wet blue високої якості. У роботі [4] за витрат полімалеїнату і поліакрилату по 1,0 % проведено дублення напівфабрикату сульфатотитанілатом амонію і основним сульфатом хрому з витратами 3,8 % TiO_2 та 1,2 % Cr_2O_3. Встановлено, що при застосуванні розроблених технологій суттєве скорочення тривалості процесу дублення напівфабрикату забезпечує зменшення вмісту дубителів у відпрацьованих розчинах у два рази. Отримані шкіри за розробленими технологіями характеризуються вищою міцністю матеріалу та його лицьового шару відповідно на 12,0–12,4 % і 35,0–45,0 %. Водночас підвищується товщина шкіри на 7,3–10,3 % та вихід площі на 1,2–1,6 %. У роботі [5] досліджено вплив сполук титану і алюмінію на процес хромового дублення сировини шкурок кроля. При цьому співвідношення Cr_2O_3/TiO_2 і Cr_2O_3/Al_2O_3 відповідно складало 3/1 та 1/1 при зменшенні витрат дубильних сполук в розрахунку на оксид відповідного металу Cr, Al, Ti 0,9, 0,8 і 0,6 % маси сировини. Встановлено умови ефективного хром-титанового і хром-алюмінієвого дублення напівфабрикату при виготовленні галантерейної шкіри з комплексом високих фізико-механічних властивостей. У роботах [6, 7] авторами досліджено ефективність застосування хром-модифікованих дисперсій монтморилоніту при дубленні напівфабрикату овчини. Встановлено зменшення вмісту сполук хрому на 30 % у відпрацьованому розчині за їх витрат 1,25 % сумісно з 2,5 % модифікованого монтморилоніту. При цьому зменшені витрати хромового дубителя на 16 % і досягнуто гідротермічної стійкості шкіри на рівні контрольного зразка 103 °С. Застосування дисперсій монтморилоніту забезпечує ефективне формування структури напівфабрикату при збільшенні його товщини на 0,9–3,5 %, об'ємного виходу на 17,0–18,0 % та виходу площі

шкіри на 4,2–4,7 %. Автори [8] дослідили вплив хітозану на процес хромового дублення напівфабрикату овчини. Встановлено зменшення витрат сполук хрому в 1,5 рази при зниженні їх концентрації у відпрацьованому розчині на 5–10 % порівняно з існуючою технологією при використанні 4 % хітозану. При цьому отримана шкіра мала гідротермічну стійкість вищу на 6–8 °С. Автори у роботі [9] дослідили вплив кислої протеази L80A і нафталінсульфонової кислоти на процес хромового дублення. При цьому встановлено збільшення ефективності використання сполук хрому з 80 до 95 %. Водночас вміст сполук хрому у відпрацьованих розчинах зменшується на 74 %. У роботі [10] наведені результати дослідження ефективності використання сполук хрому при застосуванні перед дубленням карбоксилвмісного полімеру масою до 2 кДа. Встановлено, що при витраті полімеру 1,5 % маси напівфабрикату зменшуються витрати хромового дубителя у 2,7 рази та отримується напівфабрикат Wet blue з гідротермічною стійкістю вищою 100 °С.

Аналіз науково-технічної літератури з хімічного структурування шкіряного напівфабрикату свідчить про те, що переважна більшість робіт спрямована на зменшення витрат дубильних сполук хрому або їх заміну екологічно безпечними хімічними реагентами. Однак при цьому приділяється достатня увага дубленню недвоєного напівфабрикату з сировини підвищеної товщини, зокрема великої рогатої худоби.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є встановлення фізико-хімічних особливостей хромощадного дублення недвоєного напівфабрикату з наступним додубленням двоєного напівфабрикату при використанні поверхнево-активних алкілкарбоксиетаноламінів аліфатичних кислот фракції $C_{7–9}$.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі використано напівфабрикат великої рогатої худоби з чепрачної ділянки біля огузка розміром 5 × 5 дм відповідно для дослідної і контрольної технологій. Цей напівфабрикат отриманий з ялівки важкої мокросоленого консервування масою 30 кг після міздріння сировини з товщиною зразків 3,8–4,0 мм. Зразки сировини оброблені до отримання золеного напівфабрикату – голини за типовою технологією. Типова технологія реалізована із застосуванням стандартного обладнання підготовчого відділення шкіряного заводу (підвісного барабану, міздрільної машини прохідного типу).

У процесах дублення і додублювання шкіряного напівфабрикату використано основний сульфат хрому (ОСХ) $Cr(OH)SO_4$ основністю відповідно 35–36 % і 38–42 %; алкілкарбоксиетаноламін аліфатичних кислот (АКЕА АК) як органічна сіль з середньою молекулярною масою 205; стирольний малеїновий полімер – синтан SMA-678 фірми Smit Wet End (Нідерланди). Крім того в дубильно-додублювальних процесах формування шкіряного напівфабрикату використано мурашину і сульфатну технічні кислоти, оксид магнію, форміат натрію та алюмокалієвий галун.

Фізико-хімічні властивості отриманого напівфабрикату після дублення і додублювання визначали за методиками [11]. Зокрема, оксид хрому (ІІІ) визначали йодометричним титруванням. Мінеральні речовини – гравіметричним методом. Голинну речовину в шкіряному напівфабрикаті – за ДСТУ ISO 937:2005. Коефіцієнт розподілу сполук хрому в об'ємі дерми α – за відношенням вмісту Cr_2O_3 у зовнішніх шарах до подвійного його вмісту в середньому шарі. Температуру гідротермічну стійкість $T_{гс}$ встановлювали візуально за початковим скороченням зразка у водно-гліцериновій суміші при його нагріванні з швидкістю 2–3°/хв. Пористість напівфабрикату – з використанням авіаційного гасу після ацетонового зневоднювання зразків. Фізико-механічні показники шкіряного напівфабрикату після сушильно-зволожувального оброблення зразків з наступним їх кондиціюванням за нормальних умовах – на розривній машині РМ-250М при швидкості деформування 90 мм/хв.

Дослідження процесів дублення і додублювання шкіряного напівфабрикату проведено в умовах навчально-наукової лабораторії «Експертизи шкіри та хутра» кафедри біотехнології, шкіри та хутра Київського національного університету технологій та дизайну за технологією наведеною у табл. 1.

Для встановлення ефективності розробленої технології використана діюча технологія Баришівського шкіряного заводу (контрольна). Оброблення голини перед дубленням і подальші формувальні процеси проведені у лабораторному барабані об'ємом 18 $дм^3$ при його обертанні зі швидкістю 10–12 $хв^{-1}$. Використання лабораторного підвісного барабану дозволяє відтворити умови проведення рідинних обробок в реальних умовах виробництва. Перед дубленням голина була знезолена і м'якшена. У подальшому недвоєний напівфабрикат пікелювали за розробленою технологією при pH 2,6–2,8 і менших витратах води та хлориду натрію у 1,5 рази порівняно з контрольною технологією. При цьому тривалість процесу пікелювання зменшена у 1,7 рази. На відпрацьований розчин дозуємо АКЕА АК, а через 10 хв обертання барабана до реакційної системи додаємо ОСХ. Після повного профарбування напівфабрикату сполуками хрому підвищуємо їх основність додаванням оксиду магнію до pH розчину 4,0–4,2.

На першій стадії взаємодії АКЕА АК з пікельованим напівфабрикатом цей реагент легко дифундує у його структуру. Водночас відбувається руйнування водневих міжмакромолекулярних зв'язків з утворенням аналогічних зв'язків атомів кисню і азоту органічної солі з пептидними групами колагену. З підвищенням pH робочого розчину йонізовані карбоксильні групи й аміногрупи колагену взаємодіють з атомами кисню і азоту органічної

Таблиця 1

Технологія дублення і до дублювання напівфабрикату шкур ВРХ

Процес : реагент	Витрати, %[1] і тривалість в технології	
	розробленій	діючій
Пікелювання : вода 23–25 °С + NaCl + H—COOH (85 %) + H_2SO_4 (100 %)	40 % + 4 %; 10 хв + 0,25 %; 10–15 хв + 0,5 %; 3,5–4 год	60 % + 6–7 %; 10–15 хв + 0,3 %; 10–20 хв + 0,8–1,2 %; 6–7 год
Дублення : АКЕА АК + ОСХ осн. 35 %, ОСХ осн. 36–42 %* + MgO, Na_2CO_3*	+ 0,8; 10 хв + 1,2 Cr_2O_3; 1 год 0,25 за 2 рази через 30 хв.; 5 год	– 2 % Cr_2O_3 за 2 рази з інтервалом 1 год; 0,4 %; за 2–3 рази через год; 10–12 год
Двоїння на товщину 1,3–1,4 мм		
Промивання : вода 30°С + H-COOH + АКЕА АК, ПАР тератекс*	150 % + 0,2 % 0,2 %; 40 хв	200 % + 0,2 % 0,2 %; 1 год
Додублювання: вода 30 °С + H—COOH + синтан SMA-678 + АКЕА АК, сульфірол HF-377* + ОСХ осн. 36 %, ОСХ осн. 38–42 %* + Форміат натрію	100 % + 0,25; 10 хв 1,0 %; 20 хв 0,8 %; 10 хв 1,2 % Cr_2O_3; 0 год 0,6 %; 30 хв	150 % + 0,3 %; 10 хв 1,5 %; 25 хв 1,0 %; 20 хв 2 % Cr_2O_3; 1,5 год 1 %; 1 год

Примітки. 1. Витрати реагентів у відсотках маси голини та двоєного напівфабрикату відповідно стосуються процесів дублення і додублювання;

*2. * відноситься до діючої технології.*

солі. Ці зміни в колагені підтверджуються зниженням його T_{cc} з 64 °С до 58–56 °С за сорбції АКЕА АК в кількості 3,6 % маси колагену [12]. Отже завдяки взаємодії АКЕА АК з колагеном дерми відбувається активація та пластифікація структури шкіряного напівфабрикату.

У подальшому при додаванні у реакційну систему ОСХ АКЕА АК також взаємодіє з комплексними сполуками хрому. Внаслідок найвищої спорідненості атома кисню гідроксильної групи АКЕА АК з йоном хрому, ці групи легко заміщують аквагрупу внутрішньої сфери діядерного хромового комплексу. При цьому карбонільні групи АКЕА АК утворюють побічний зв'язок з катіоном хрому. Водночас зростає різниця електронної густини між киснем і воднем гідроксильної групи АКЕА АК, що сприяє відщепленню атома водню та його міграції у зовнішню сферу комплексної сполуки хрому до групи —SO_4 і відтягуванню електронної густини кисню карбонільної групи АКЕА АК до вуглецю. Внаслідок цього йонний зв'язок угрупування —O^- · NH_3^+– АКЕА АК розривається з приєднанням водню аміногрупи до кисню карбонільної групи органічної солі. Звільнена аміногрупа АКЕА АК взаємодіє з катіоном хрому з утворенням стійкого п'ятичленного циклу, що сприяє взаємодії активних груп колагену, насамперед карбоксильних, з комплексними сполуками хрому при заміщенні нею молекули води, розташованої у трансположенні. Це підтверджується зниженням pH середовища на 1,0 протягом доби.

На відміну від розробленої технології хромового дублення витрати ОСХ у діючій технології підвищені у 1,7 рази. При цьому тривалість процесу дублення за розробленою технологією зменшена більше ніж у два рази.

Для отримання шкіри необхідної товщини дублений напівфабрикат двоїться на двоїльно-стрічкові машині прохідного типу. При цьому відбувається деяке зниження T_{cc} двоєного напівфабрикату в результаті нерівномірного розподілу сполук хрому в структурі недвоєного напівфабрикату. Для цього підвищуємо ступінь його структурування шляхом додублювання. Перед додублюванням напівфабрикат промивають з додаванням мурашиної кислоти і АКЕА АК протягом 10 хв. Після зливання відпрацьованого розчину у барабан наливають воду і для зниження pH напівфабрикату додають мурашину кислоту, а через 10 хв обертання барабана – синтан SMA-678 для зміцнення лицьового шару напівфабрикату. Через 20 хв в барабан вводять АКЕА АК і через 10 хв перемішування у систему дозують хромовий дубитель, основність якого підвищують форміатом натрію через одну годину протягом 30 хв.

Введення АКЕА АК на стадії додублювання супроводжується взаємодією цієї органічної солі з структурованим колагеном за участю йонізованих груп кисню і азоту. При цьому аміногрупи і пептидні групи колагену дерми, що не приймали участі у взаємодії при дубленні з комплексними сполуками хрому, вступають у взаємодію з ними при додублюванні. Водночас відбувається взаємодія колагену за участю атомів кисню і азоту пептидних груп, в тому числі й аміногруп, колагену з комплексними йонами хрому. При цьому зменшуються витрати сполук хрому при додублюванні у 1,7 рази і скорочується тривалість технологічного процесу в 1,6 рази. Процес дублення хромового напівфабрикату завершували підвищенням pH технологічного розчину до значення 4,8 при додаванні алюмокалієвого галуну маскованого форміатом натрію. Після цього виконували комплекс сушильно-зволожувальних процесів і операції за стандартною технологією та визначали фізико-хімічні властивості отриманого напівфабрикату (табл. 2).

З наведених даних видно, що недвоєний напівфабрикат хромового дублення, отриманий за розробленою технологією характеризується більш рівномірним пошаровим розподілом сполук хрому на 11,0 % порівняно

Таблиця 2

Фізико-хімічні властивості напівфабрикату хромового дублення

Показник напівфабрикату	Технологія	
	розроблена	діюча
Дубленого: $T_{гс}$, °С	110 / 105	109 / 102
вмісту Cr_2O_3, %	3,91 / 4,16	4,71 / 5,13
α	0,91	0,82
мінеральних речовин, %	7,23 / 8,17	8,24 / 9,38
Пористість напівфабрикату, %, знезоленого	60,0	60,0
– м'якшеного	69,0	69,0
– дубленого	63,0 / 65,0	62,0 / 63,5
Межа міцності при розриванні, МПа	29,0 / 16,0	27,0 / 15,5
Подовження при напруженні 10 МПа, %	11,0 / 21,0	9,0 / 19,0

Примітка. У чисельнику і знаменнику наведені результати дублення відповідно недвоєного і двоєного напівфабрикату.

з контрольною технологією. При цьому вміст сполук хрому в напівфабрикаті є меншим на 17,0 %. Разом з тим за величинами $T_{гс}$ і пористості отримані зразки за розробленою та контрольною технологіями практично не відрізняються. Слід зауважити, що для дублення напівфабрикату в обох випадках використано зразки однакової пористості після процесів знезолювання та м'якшення.

Після двоїння шкіряний напівфабрикат, отриманий за розробленою і контрольною технологіями, характеризується підвищеним вмістом сполук хрому в структурі порівняно з недвоєним напівфабрикатом відповідно на 6,4 % та 8,9 % зі зниженням $T_{гс}$. При цьому вміст сполук хрому в першому випадку є меншим на 23,0 %. Аналогічний ефект спостерігається і для вмісту мінеральних сполук в шкіряному напівфабрикаті. Такі зміни вмісту сполук хрому і мінеральних речовин після двоїння напівфабрикату обумовлені їх вищим вмістом у лицьовому шарі недвоєного напівфабрикату. При цьому дещо підвищується пористість двоєного напівфабрикату. Водночас міцність двоєного напівфабрикату знижується в результаті видалення значної частини потужного сітчастого шару з високим кутом переплетення пучків колагенових волокон. Разом з тим підвищується подовження зразків напівфабрикату при напруженні 10 МПа.

Результати дослідження фізико-хімічних властивостей шкіряного напівфабрикату після його додублювання наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Фізико-хімічні властивості додубленого напівфабрикату

Показник напівфабрикату	Технологія	
	розроблена	діюча
Додубленого, $T_{гс}$, °С:	112,0	109,0
вмісту Cr_2O_3, %	5,56	6,76
мінеральних речовин, %	8,32	9,68
Пористість, %	63,0	61,5
Межа міцності при розриванні, МПа	22,0	20,6
Подовження при напруженні 10 МПа, %	20,5	18,0

З отриманих даних видно, що додублений напівфабрикат за розробленою технологією відрізняється від напівфабрикату, отриманого за діючою технологією меншим вмістом сполук хрому на 21,6 % при вищому значенні $T_{гс}$. При цьому пористість зразків порівняно з двоєним напівфабрикатом після дублення дещо зменшується. Водночас міцність напівфабрикату підвищилась відповідно на 38,0 і 32,0 % при зменшенні його подовження при 10 МПа. Отже, з отриманих даних видно, що напівфабрикат, виготовлений за розробленою технологією після додублювання характеризується вищим ступенем структурування порівняно з діючою технологією. Разом з тим менші витрати сполук хрому на стадіях дублення-додублювання в 1,7 рази при зменшенні тривалості цих процесів в 1,9 рази свідчить про вищу ефективність розробленої технології виготовлення еластичної шкіри.

Висновки

Досліджено процеси хромощадного дублення недвоєного напівфабрикату і додублювання хромового напівфабрикату з використанням алкілкарбоксиетаноламінів аліфатичних кислот фракції C_{7-9}. Процес дублення недвоєного напівфабрикату з сировини великої рогатої худоби важкої маси завдяки використанню поверхнево-активного алкілкарбоксиетаноламіну дає можливість отримати шкіряний напівфабрикат з вищою пошаровою рівномірністю розподілу сполук хрому. При цьому витрати хромового дубителя зменшено в 1,7 рази порівняно з існуючою технологією. Встановлено вплив зміни структури недвоєного і двоєного напівфабрикату на особливості взаємодії основних сполук хрому з колагеном дерми в присутності поверхнево-активного алкілкарбоксиетаноламіну. Блокування молекулами алкілкарбоксиетаноламіну карбоксильних груп колагену сприяє дифузії

в дерму напівфабрикату сполук хрому та їх взаємодії з молекулами алкілкарбоксиетаноламіну. У подальшому атоми хрому взаємодіють з йонізованими карбоксильними групами колагену з утворенням внутрішньо координаційних ковалентних зв'язків хром-колаген.

При додублюванні менш активні пептидні групи колагену вступають у взаємодію з комплексними сполуками хрому вищої основності. При цьому підвищується ступінь структурування колагену напівфабрикату, його міцність і термостійкість.

Порівняльний аналіз технологій свідчить про переваги процесів дублення та додублювання перед існуючими, що полягають у менших витратах екологічно небезпечних сполук хрому, води та скороченні тривалості відповідно в 1.7, 1.4 і 2,1–2,2 рази. Це дає підстави вважати, що розроблені дубильно-додублювальні процеси є хромощадними і можуть бути екологічно орієнтованими та ефективно використовуватись при розробленні технологій виготовлення еластичних шкіряних матеріалів з інших видів сировини. При цьому впровадження розробленої технології не потребуватиме переоснащення шкіряного підприємства.

Список використаної літератури

1. Liu X., Wang Y., Wang X., Han T., Wang W., Jiang H. A salt-free pickling and chrome-free tanning technology: a sustainable approach for cleaner leather manufacturing. *Green Chemistry*. 2022. Vol. 24, № 5. P. 2179–2192. https://doi.org/10.1039/D1GC04105C

2. Ніконова А. В., Андреєва О. А., Майстренко Л. А. Визначення оптимальних умов процесу титанового дублення в присутності полімерної сполуки на основі малеїнової кислоти. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2016. № 1. С. 196–201.

3. Майстренко Л. А., Андреєва О. А., Коляда М. К. Дослідження процесу хромового дублення із застосуванням полімерного матеріалу – похідної малеїнової кислоти. *Технології та дизайн*. 2013. № 4 (9). С. 1–13.

4. Andreyeva O., Nikonova A., Maistrenko L. Investigation on polymer-mineral tanned leather. Properties. *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 267. P. 98–102. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.267.98

5. Kudabayeva A., Abzalbekuly B., Dandar U., та ін. New Technology for Production of Leather for Gloves and Fancy Goods. *Tekstil ve konfeksiyon*. 2020. Vol. 30, № 4. P. 270–275. https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.650595

6. Паламар В. А., Марухленко М. О., Мокроусова О. Р. Застосування хром-модифікованих дисперсій монтморилоніту для стабілізації колагенової структури дерми. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2015. Т. 3, № 6(75). С. 36–42.

7. Marukhlenko M. O., Palamar V. A., Mokrousova O. R. Stabilizing derma collagen structure with modified dispersions of montmorillonite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 111(1). P. 1–8. DOI 10.1088/1757-899X/111/1/012023

8. Плаван В. П., Ковтуненко О. В., Каташинський А. С. Застосування хітозану у виробництві шкір. Удосконалення процесу хромового дублення. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2009. № 3. С. 53–59.

9. Zhang Xu, Chattha Sadaqat Ali, Song Jinzhi, Zhang Chunxiao, Peng Biyu. An integrated pickling-bating technology for reducing ammonia-nitrogen and chloride pollution in leather manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 375. 134070. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134070

10. Yao Q., Li C., Huang H., та ін. The relationship between the structure of hyper-branched polymer and its effect on high exhaust chrome in reduced chrome tanning. *JALCA*. 2017. Vol. 112, № 5. P. 153–161.

11. Данилкович А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Фенікс, 2006. 340 с.

12. Екологічно орієнтовані технології виробництва шкіряних та хутрових матеріалів для створення конкурентоспроможних товарів : монографія : у 2 ч. Ч. 1 / А. Г. Данилкович, В. І. Ліщук, В. П. Плаван, Е. Є. Касьян, О. Г. Жигоцький ; за ред. А. Г. Данилковича. Київ : Фенікс, 2011. 438 с.

References

1. Liu, X., Wang, Y., Wang, X., Han, T., Wang, W., & Jiang, H. (2022). A salt-free pickling and chrome-free tanning technology: A sustainable approach for cleaner leather manufacturing. *Green Chemistry*, 24(5), 2179–2192. https://doi.org/10.1039/D1GC04105C

2. Nikonova, A. V., Andreeva, O. A., & Maistrenko, L. A. (2016). Vyznachennia optymalnykh umov protsesu tytanovoho dublennia v prysutnosti polimernoi spoluky na osnovi maleinovoi kysloty. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, (1), 196–201.

3. Maistrenko, L. A., Andreeva, O. A., & Koliada, M. K. (2013). Doslidzhennia protsesu khromovoho dublennia iz zastosuvanniam polimernoho materialu – pokhidnoi maleinovoi kysloty. *Tekhnolohii ta dyzain*, 4(9), 1–13.

4. Andreyeva, O., Nikonova, A., & Maistrenko, L. (2017). Investigation on polymer-mineral tanned leather. Properties. *Solid State Phenomena*, 267, 98–102. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.267.98

5. Kudabayeva, A., Abzalbekuly, B., Dandar, U., et al. (2020). New technology for production of leather for gloves and fancy goods. *Tekstil ve konfeksiyon*, 30(4), 270–275. https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.650595

6. Palamar, V. A., Marukhlenko, M. O., & Mokrousova, O. R. (2015). Zastosuvannia khrom-modyfikovanykh dyspersii montmorylonitu dlia stabilizatsii kolahenovoi struktury dermy. *Skhidno-ievropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 3(6[75]), 36–42.

7. Marukhlenko, M. O., Palamar, V. A., & Mokrousova, O. R. (2016). Stabilizing derma collagen structure with modified dispersions of montmorillonite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 111(1), 1–8. DOI 10.1088/1757-899X/111/1/012023

8. Plavan, V. P., Kovtunenko, O. V., & Katashynskyi, A. S. (2009). Zastosuvannia khitozanu u vyrobnytstvi shkir. Udoskonalennia protsesu khromovoho dublennia. *Visnyk KNUTD*, (3), 53–59.

9. Zhang, Xu; Chattha, Sadaqat Ali; Song, Jinzhi; Zhang, Chunxiao; Peng, Biyu. (2022). An integrated pickling-bating technology for reducing ammonia-nitrogen and chloride pollution in leather manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134070. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134070

10. Yao, Q., Li, C., Huang, H., et al. (2017). The relationship between the structure of hyper-branched polymer and its effect on high exhaust chrome in reduced chrome tanning. *JALCA*, 112(5), 153–161.

11. Danylkovych, A. G. (2006). *Praktykum z khimii i tekhnolohii shkiry ta khutra* (2-he vyd., pererob. i dop.). Kyiv : Feniks.

12. Danylkovych, A. H., Lishchuk, V. I., Plavan, V. P., Kasian, E. Ye., Zhyhotskyi, O. H. (2011). *Ekologichno oriientovani tekhnolohii vyrobnytstva shkirianykh ta khutrovykh materialiv dlia stvorennia konkurentospromozhnykh tovariv: monohrafiia* (Ch. 1). Kyiv : Feniks.

УДК 681.518.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.6

А. О. ДЕРКАЧЕНКО
аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-0443-0329

О. В. ПОЛИВОДА
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-6323-3739

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ПРОМИСЛОВИХ АВТОКЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СФЕРИЧНОГО ПАРАЛЕЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ

Стаття присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності та надійності діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів, які використовуються у багатьох галузях. Традиційні методи контролю часто є трудомісткими, суб'єктивними та не завжди забезпечують повне покриття, що зумовлює необхідність розробки автоматизованих систем діагностики. Метою дослідження є розробка автоматизованої системи для діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів з використанням сферичного паралельного механізму (СПМ). СПМ завдяки своїй кінематичній структурі забезпечує високу маневреність та орієнтацію діагностичного інструменту у широкому діапазоні кутів, що важливо для обстеження складних геометричних форм автоклавів. Проаналізовано існуючі методи автоматизованого сканування та планування траєкторій, зокрема методи на основі геометричних моделей та алгоритми пошуку шляху (A, RRT). Розглянуто стратегії сканування внутрішніх поверхонь автоклавів, такі як лінійне, спіральне, кругове, зигзагоподібне та квадратне сканування, з урахуванням форми автоклава, характеристик датчика та мети діагностики. Для реалізації траєкторій сканування внутрішньої поверхні автоклава, обходу перешкод або фокусування на певних областях запропоновано застосовувати рішення зворотньої задачі кінематики для визначення потрібних положень приводів на кожному кроці руху. Наведено результати моделювання руху СПМ за типовими траєкторіями (спіраль, коло, зигзаг, квадрат). Розроблено структуру автоматизованої системи, що включає операторський інтерфейс, центральний контролер, модулі планування траєкторії та керування рухом СПМ, систему керування датчиком, блок керування приводами СПМ, систему збору та попередньої обробки даних, власне СПМ, діагностичний інструмент (датчик), систему аналізу та інтерпретації даних, а також систему збереження даних, архівування та формування звітів. Розроблена автоматизована система демонструє гнучкість та адаптивність до різних типів і розмірів промислових автоклавів та забезпечує підвищення ефективності, швидкості та об'єктивності контролю стану їх внутрішніх поверхонь. Перспективою подальших досліджень є розробка ефективних методів аналізу даних та оцінки параметрів дефектів.*

Ключові слова: *автоматизована система діагностики, сферичний паралельний механізм, керування рухом, планування траєкторії, зворотня задача кінематики, промислові автоклави, стратегії сканування.*

A. O. DERKACHENKO
Postgraduate Student at the Automation, Robotics
and Mechatronics Department
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-0443-0329

O. V. POLYVODA
Candidate of Sciences in Technology,
Associate Professor at the Automation, Robotics
and Mechatronics Department
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-6323-3739

AUTOMATED SYSTEM FOR DIAGNOSING INTERNAL SURFACES OF INDUSTRIAL AUTOCLAVES USING A SPHERICAL PARALLEL MECHANISM

The article is devoted to the solution of the actual problem of increasing the efficiency and reliability of diagnostics of the internal surfaces of industrial autoclaves, which are used in many branches. Traditional control methods are often laborious, subjective and do not always provide complete coverage, which necessitates the development of automated diagnostic systems. The purpose of the study is to develop an automated system for diagnosing the internal surfaces of industrial autoclaves using a spherical parallel mechanism (SPM). The SPM, due to its kinematics structure, provides high maneuverability and orientation of the diagnostic tool in a wide range of angles, which is important for examining complex geometric shapes of autoclaves. Existing methods of automated scanning and trajectory planning are analyzed, in particular methods based on geometric models and path search algorithms (A, RRT). Strategies for scanning the internal surfaces of autoclaves, such as linear, spiral, circular, zigzag and square scanning, are considered, taking into account the shape of the autoclave, sensor characteristics and diagnostic purpose. To implement trajectories for scanning the inner surface of the autoclave, avoiding obstacles or focusing on certain areas, it is proposed to use the solution of the inverse kinematics problem to determine the required positions of the drives at each step of the movement. The results of modeling the SPM movement along typical trajectories (spiral, circle, zigzag, square) are presented. The structure of an automated system has been developed, which includes an operator interface, a central controller, SPM trajectory planning and motion control modules, a sensor control system, a SPM drive control unit, a data collection and pre-processing system, the SPM itself, a diagnostic tool (sensor), a data analysis and interpretation system, as well as a data storage, archiving and report generation system. The developed automated system demonstrates flexibility and adaptability to different types and sizes of industrial autoclaves and provides increased efficiency, speed and objectivity of monitoring the condition of their inner surfaces. The prospect of further research is the development of effective methods for data analysis and evaluation of defect parameters.*

Key words: *automated diagnostic system, spherical parallel mechanism, motion control, trajectory planning, inverse kinematics problem, industrial autoclaves, scanning strategies.*

Постановка проблеми

Промислові автоклави є критично важливим обладнанням у багатьох галузях, включаючи харчову та хімічну промисловість. Забезпечення надійної та безпечної експлуатації автоклавів є важливим завданням, оскільки не виявлені вчасно пошкодження внутрішніх поверхонь автоклавів можуть призвести до суттєвих економічних втрат, зупинки виробництва та становити загрозу для життя персоналу [1]. Традиційні методи контролю стану внутрішніх поверхонь автоклавів такі як візуальний, ультразвуковий, радіографічний, магнітопорошковий, капілярний контроль та використання методу акустичної емісії [2] часто є трудомісткими, вимагають значного часу на підготовку та проведення діагностики, а також можуть бути суб'єктивними та не завжди забезпечувати повне охоплення всієї поверхні, що призводить до пропуску важливих дефектів, особливо у важкодоступних місцях. Тому розробка та впровадження автоматизованих систем діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів є особливо актуальною, оскільки це забезпечить значне підвищення ефективності, швидкості, точності та об'єктивності контролю. Перспективним напрямком у створенні таких автоматизованих систем є використання сферичних паралельних механізмів. Завдяки кінематичній структурі, СПМ забезпечують високу маневреність та можливість орієнтації пристрою або сенсору, який використовується для збору інформації про стан внутрішньої поверхні, в широкому діапазоні кутів, що є особливо важливим для дослідження поверхонь автоклавів зі складними геометричними формами.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка автоматизованої системи діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів з використанням сферичного паралельного механізму для забезпечення ефективного сканування на основі впровадження сучасних методів та стратегій сканування поверхонь, застосування рішення зворотньої задачі кінематики для точного керування рухом діагностичного інструменту за траєкторіями сканування та забезпечення адаптивності системи до різних типів і розмірів автоклавів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розробка ефективних методів автоматизованого сканування внутрішньої поверхні автоклава з урахуванням складності форми є важливим завданням при реалізація систем реального часу для керування рухом приводів СПМ з метою точного позиціонування та орієнтації діагностичного інструменту у визначених точках траєкторії. Розробка алгоритмів планування траєкторії для автоматичного визначення оптимального шляху руху діагностичного інструменту всередині автоклава включає врахування складної геометрії внутрішньої поверхні, наявності перешкод, внутрішніх елементів конструкції, необхідності повного покриття досліджуваної області та мінімізації часу діагностики. Для планування траєкторії руху діагностичного інструменту, встановленого на сферичному паралельному механізмі, можуть застосовуватися методи на основі геометричних моделей та алгоритми пошуку шляху.

Методи на основі геометричних моделей [3] передбачають створення точної цифрової моделі внутрішнього простору автоклава, включаючи його геометричні характеристики та розташування можливих перешкод. На

основі таких моделей використовуються різні геометричні алгоритми для визначення шляху, вільного від перешкод. Наприклад, робочий простір розбивається на тривимірні кубічні елементи – вокселі. Вокселі позначаються як вільні або зайняті перешкодами. Планування шляху полягає у знаходженні послідовності вільних вокселів між початковою та кінцевою точками. Ще один підхід полягає в моделюванні не фізичного простору, а простору можливих конфігурацій маніпулятора, наприклад, кутів поворотних ланок. Перешкоди у фізичному просторі відображаються як заборонені області в конфігураційному просторі, в якому відбувається планування шляху. Для СПМ конфігураційний простір може бути складним через його кінематику. Методи на основі геометричних моделей дозволяють точно враховувати геометрію робочого простору і перешкод, а також можуть забезпечити оптимальні або близькі до оптимальних шляхи, залежно від використовуваного алгоритму. Проте, побудова точної геометричної моделі може бути складною, особливо для автоклавів складної форми або з невідомими внутрішніми елементами, а обчислювальна складність алгоритмів може зростати експоненційно зі збільшенням розмірності робочого простору.

Алгоритми пошуку шляху використовуються для знаходження оптимального або допустимого шляху між початковою та кінцевою точками в графі, де вузлами є можливі стани, наприклад, положення та орієнтація інструменту, а ребрами – можливі переміщення між цими станами. Прикладом таких алгоритмів є A* – евристичний алгоритм пошуку найкоротшого шляху [4], який використовує функцію оцінки

$$f(n) = g(n) + h(n), \tag{1}$$

де g(n) – вартість шляху від початкової точки до поточного вузла n, $h(n)$– евристична оцінка вартості шляху від вузла n до цільової точки. Вузлами графа можуть бути дискретизовані положення та орієнтації інструменту, а вартість ребер – відстань або час переміщення. RRT – ймовірнісний алгоритм [5], який досліджує простір конфігурацій, будуючи дерево випадкових станів, починаючи з початкової конфігурації. Нові стани генеруються випадково, після чого до дерева додається найближчий існуючий стан, якщо з'єднання з новим станом не призводить до зіткнення. Пошук шляху завершується, коли дерево досягає цільової конфігурації. Алгоритм RRT та його модифікації підходить для задач з високою розмірністю конфігураційного простору та складними перешкодами. Наведені алгоритми пошуку шляху добре опрацьовані та мають теоретичне обґрунтування, проте дискретизація робочого або конфігураційного простору може призвести до втрати точності або збільшення обчислювальної складності, ефективність алгоритму A* істотно залежить від якості евристичної функції, а RRT є ймовірнісним алгоритмом і не завжди гарантує знаходження оптимального шляху.

Вибір конкретних методів або їх комбінацій залежить від складності геометрії автоклава, наявності перешкод, вимог до повноти покриття, точності позиціонування та часу діагностики.

Викладення основного матеріалу дослідження

Стратегія сканування визначає спосіб переміщення діагностичного інструменту по внутрішній поверхні автоклава для її повного дослідження. Вибір стратегії сканування починається з розділення внутрішньої поверхні автоклава на скінченну кількість точок або областей для проведення вимірювань або збору даних датчиком. Кількість та розташування цих точок визначають щільність сітки сканування, де щільніша сітка забезпечує детальніше покриття та вищу ймовірність виявлення дрібних дефектів, проте збільшує час сканування та обсяг даних для подальшої обробки. У деяких випадках доцільно використовувати адаптивну сітку, щільність якої змінюється залежно від попередніх даних або характеристик поверхні, збільшуючись в областях з підозрілими ознаками. Способи формування сітки залежать від форми автоклава: лінійне сканування передбачає рух інструменту паралельними лініями, що забезпечує покриття всієї поверхні, однак може бути неефективним для складних геометричних форм. Спіральне сканування полягає в русі інструменту по спіралі з наближенням до центру або віддаленням від нього, що може бути ефективним для циліндричних або сферичних поверхонь. Сканування за контуром передбачає рух інструменту вздовж заданих контурів або перерізів поверхні. Для автоклавів складної форми може знадобитися складніша параметризація поверхні та проектування для неї сітки.

Форма автоклава значною мірою визначає оптимальну траєкторію руху діагностичного інструменту. При автоматизованій діагностиці внутрішніх поверхонь найчастіше застосовується рух діагностичного інструменту по траєкторіях: спіраль, коло, зигзаг, квадрат, що обумовлюється їх оптимальними характеристиками для заданих форм автоклавів, типів датчиків та завдань діагностики. Приклади формування таких траєкторій для різних форм автоклавів та їх елементів наведено на рисунку 1.

Спіральна траєкторія ефективна для обстеження поверхонь з осьовою симетрією, таких як циліндричні або конічні частини автоклавів, а також сферичні днища чи кришки, оскільки забезпечує поступове та рівномірне покриття поверхні, починаючи з центральної точки та розширюючись до краю елементу, що сканується. Такий підхід забезпечує рівномірне покриття та відносно однорідну щільність сканування по всій площі, що важливо для виявлення дефектів будь-якого розміру та розташування, а також ефективність для круглих або осьово-симетричних форм, що мінімізує холості переміщення порівняно з лінійним скануванням. Також спіральна траєкторія часто може бути реалізована як безперервний рух, що зменшує навантаження на механізм та скорочує час

сканування. Завдяки цим властивостям, спіральне сканування ідеально підходить для обстеження внутрішніх стінок циліндричних автоклавів (при комбінації руху вздовж осі з обертанням) та для сканування сферичних або злегка вигнутих поверхонь.

Кругові траєкторії застосовуються для детального обстеження локалізованих областей або для сканування поверхонь, що мають кругову симетрію в певному перерізі, таких як фланцеві з'єднання, отвори або кільцеві зварні шви. Рух по кругу може використовуватися для підтримки постійної відстані або кута між датчиком та поверхнею при обстеженні циліндричних або конічних об'єктів шляхом руху навколо їхньої осі на фіксованій висоті. Кругові траєкторії надають можливість детального обстеження локальних зон завдяки багаторазовому проходженню однієї й тієї ж області для глибшого аналізу, забезпечують спрощення підтримки постійних параметрів сканування, таких як фіксована відстань або кут між датчиком і поверхнею, що є важливим для деяких типів датчиків. Ще однією перевагою є простота програмування руху навколо циліндричних або круглих елементів конструкції.

Зигзагоподібна траєкторія – це варіант лінійного сканування, що застосовується для покриття плоских або близьких до плоских поверхонь, а також для сканування розгорток циліндричних поверхонь. Зміна напрямку руху на кінці кожної лінії забезпечує ефективне покриття всієї області без необхідності повернення до початкової точки кожної нової лінії. Сканування по зигзагоподібній траєкторії забезпечує повне покриття плоских областей при відповідній програмній реалізації послідовності лінійних рухів зі зміною напрямку. Застосовується зигзагоподібне сканування для обстеження плоских днищ або кришок автоклавів, а також циліндричних стінок, за умови можливості лінійного переміщення датчика вздовж та навколо осі циліндра.

Квадратна або прямокутна траєкторія використовується для покриття плоских або локалізованих областей при детальному скануванні невеликих ділянок з метою виявлення локальних дефектів або для калібрування датчика на певній ділянці поверхні, а також як базова комірка для складніших стратегій сканування великих площ. Перевагами такого підходу є детальне обстеження невеликих зон, систематичне покриття локальних прямокутних областей та простота програмування послідовності рухів по периметру квадрата або прямокутника із заданим кроком для локальних завдань. Застосовується для детального сканування областей навколо виявлених дефектів, зон підвищеної корозійної активності, а також для калібрувальних процедур на тестових ділянках.

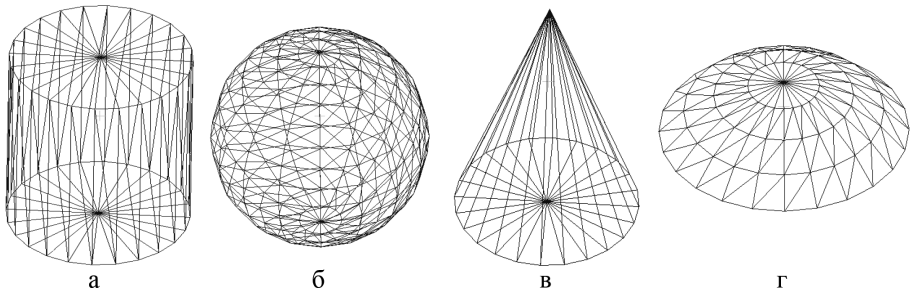


Рис. 1. Приклади формування траєкторій сканування для різних форм автоклавів та їх елементів

Використання сферичного паралельного механізму в структурі автоматизованої системи діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів є перспективним, що обумовлюється його високою маневреністю, здатністю орієнтувати діагностичний інструмент у широкому діапазоні кутів. Структура СПМ з кількома ступенями вільності обертального руху дозволяє ефективно досягати та сканувати важкодоступні ділянки, забезпечуючи повніше покриття поверхні порівняно з традиційними послідовними маніпуляторами, які можуть мати обмеження в орієнтації скануючого інструменту.

Застосування СПМ дозволяє реалізувати різні стратегії сканування, включаючи спіральне, кругове, лінійне або комбіновані траєкторії, адаптовані до конкретної форми автоклава та вимог до обстеження. Можливість точного програмування рухів СПМ сприяє автоматизації процесу сканування, зменшуючи час діагностики та вплив людського фактора, підвищуючи тим самим ефективність та об'єктивність контролю стану внутрішньої поверхні автоклавів.

Сферичний паралельний механізм складається з рухомої платформи, до якої кріпиться інструмент, та трьох пар послідовно з'єднаних ланок. Кожна пара з'єднується з платформою через шарніри C, C2, C3 (верхні ланки) та з обертальними шестернями A, A2, A3 (нижні ланки) через шарніри B, B2, B3. Обертання шестерень A, A2, A3, що є вхідними параметрами керування, визначає рух платформи. В [6] наведено детальний опис структури СПМ з позиціонуючою платформою та відповідна тривимірна кінематична модель.

Для сферичного паралельного механізму зв'язок між кутами приводів та положенням рухомої платформи є складним і описується нелінійними тригонометричними рівняннями. Не існує простих аналітичних виразів, які б дозволили визначити значення кутів приводів безпосередньо із заданих координат та орієнтації платформи.

Рішення зворотної задачі кінематики дозволяє визначити необхідні кути приводів (обертання шестерень A, A2, A3) для досягнення заданої позиції та орієнтації рухомої платформи і закріпленого на ній інструменту.

Для визначення обмежень руху шарнірів B, B2, B3 сферичного паралельного механізму вздовж вертикальної осі z, використовуються радіуси R_0, R_1, R_3, які визначають максимально можливу відстань проєкцій шарнірів B, B2, B3 від осі z обумовлену фізичними обмеженнями конструкції механізму. Радіуси R_0, R_1, R_3 є статичними параметрами, які розраховуються одноразово на основі початкової конфігурації механізму за виразами:

$$R_0 = \sqrt{R_C^2 - z_0^2}, \quad R_2 = \sqrt{R_C^2 - z_2^2}, \quad R_3 = \sqrt{R_C^2 - z_3^2}, \tag{2}$$

де R_C – довжина ланки між шарнірами C і B, C2 і B2, C3 і B3, z_0, z_2, z_3– положення шарнірів C, C2, C3.

Для розрахунку кута повороту θ шестерні A необхідно визначити положення шарніра B вздовж осі z або проєкцію на вісь $x - B_X$ та проєкцію на вісь $y - B_Y$ за формулами:

$$B_X = \frac{x_0^2(x_0^2 + R_1^2 - R_0^2 + y_0^2) - \sqrt{F} \cdot y_0}{2x_0(x_0^2 + y_0^2)}, \quad B_Y = \frac{y_0}{2} + \frac{R_1^2 y_0 - R_0^2 y_0 + \sqrt{F}}{2(x_0^2 + y_0^2)}, \tag{3}$$

де R_1 – довжина ланки між шарніром B і шестернею A, x_0 – положення шарніра C вздовж осі x, y_0 – положення шарніра C вздовж осі y,

$$F = -R_1^4 x_0^2 - x_0^6 - y_0^4 x_0^2 - 2x_0^4 y_0^2 + 2x_0^4 R_2^2 - x_0^2 R_2^4 + 2x_0^4 R_1^2 + 2x_0^2 y_0^2 R_2^2 + 2x_0^2 y_0^2 R_1^2 + 2x_0^2 R_1^2 R_2^2. \tag{4}$$

Для визначення положення шарнірів B2 та B3 застосовуються аналогічні (3) формули:

$$B_{2X} = \frac{x_2^2(x_2^2 + R_1^2 - R_2^2 + y_2^2) - \sqrt{F} \cdot y_2}{2x_2(x_2^2 + y_2^2)}, \quad B_{2Y} = \frac{y_2}{2} + \frac{R_1^2 y_2 - R_2^2 y_2 + \sqrt{F}}{2(x_2^2 + y_2^2)}, \tag{5}$$

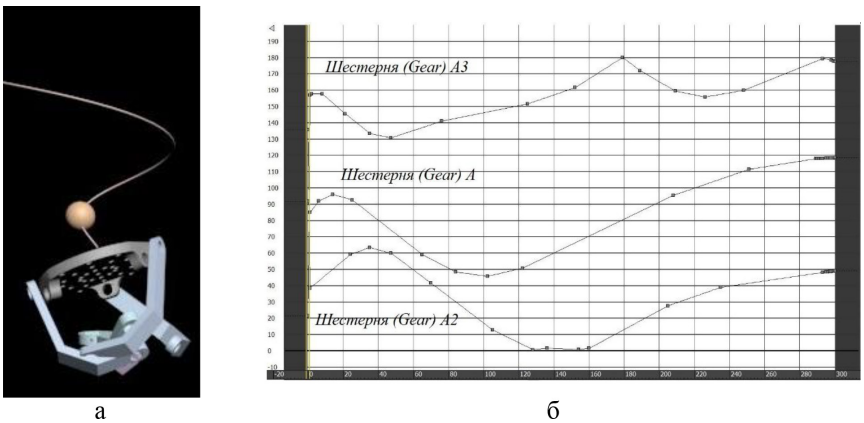
$$B_{3X} = \frac{x_3^2(x_3^2 + R_1^2 - R_3^2 + y_3^2) - \sqrt{F} \cdot y_3}{2x_3(x_3^2 + y_3^2)}, \quad B_{3Y} = \frac{y_3}{2} + \frac{R_1^2 y_3 - R_3^2 y_3 + \sqrt{F}}{2(x_3^2 + y_3^2)}. \tag{6}$$

де $x_2(x_3)$ – положення шарніра C2 (C3) вздовж осі x, $y_2(y_3)$ – положення шарніра C2 (C3) вздовж осі y.

$$\theta = \frac{180}{\pi}\arccos\left(\frac{B_X}{R_1}\right), \quad \theta_2 = \frac{180}{\pi}\arccos\left(\frac{B_{2X}}{R_1}\right), \quad \theta_3 = \frac{180}{\pi}\arccos\left(\frac{B_{3X}}{R_1}\right). \tag{7}$$

Формули (7) є результатом повного розрахунку зворотної кінематики і дозволяють обчислити повні кути повороту θ, θ_2, θ_3 для кожної з шестерень A, A2, A3. Кути θ, θ_2, θ_3 вказують на абсолютне положення кожної шестерні відносно умовної нульової точки, яка співпадає з нульовим кутом відповідного сервопривода. Значення кутів θ, θ_2, θ_3 є командами керування для сервоприводів, що приводять в рух СПМ.

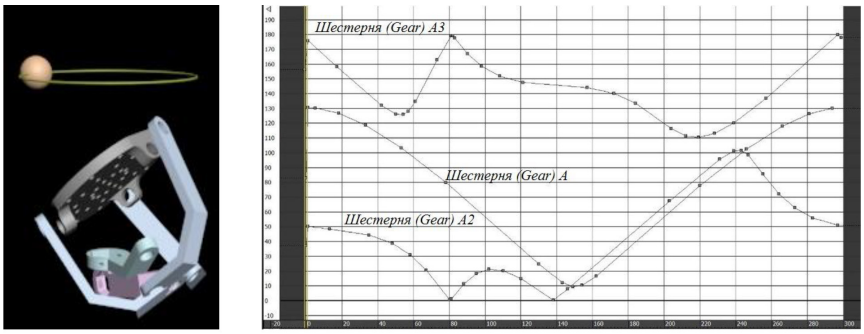
На рисунках 2–5 наведені закони переміщення для сферичного паралельного механізму, отримані при проведені розрахункового експерименту, який проводився для типових траєкторій: спіраль (рисунок 2), коло (рисунок 3), зигзаг (рисунок 4), квадрат (рисунок 5).



а б

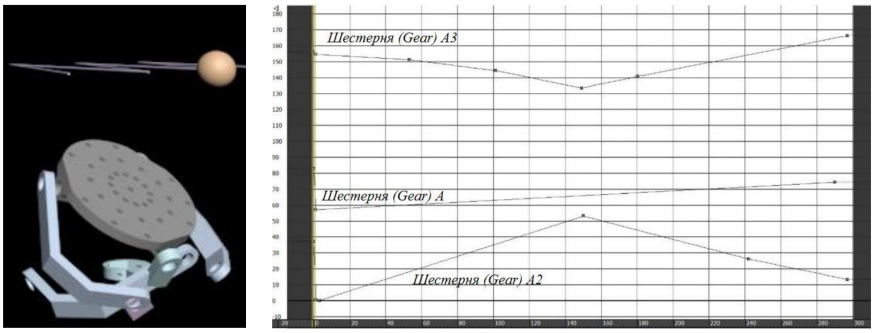
Рис. 2. Моделювання процесу переміщення цілі по траєкторії спіраль: а) скріншот перспективи з ціллю при русі по траєкторії спіраль; б) експериментальні закономірності переміщення

На основі проведених досліджень розроблена автоматизована система сканування внутрішньої поверхні автоклавів (рисунок 6), що ґрунтується на ефективних методах сканування, які враховують складність форми та можливі перешкоди, а також на розв'язанні зворотної задачі кінематики для керування сферичним паралельним



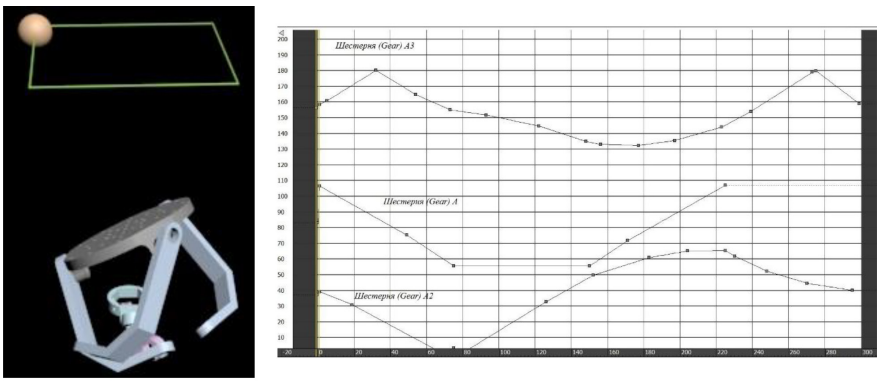
а б

Рис. 3. Моделювання процесу переміщення цілі по траєкторії коло: а) скріншот перспективи з ціллю при русі по траєкторії коло; б) експериментальні закономірності переміщення



а б

Рис. 4. Моделювання процесу переміщення цілі по траєкторії зігзаг: а) скріншот перспективи з ціллю при русі по траєкторії зігзаг; б) експериментальні закономірності переміщення



а б

Рис. 5. Моделювання процесу переміщення цілі по траєкторії квадрат: а) скріншот перспективи з ціллю при русі по траєкторії квадрат; б) експериментальні закономірності переміщення

механізмом, що забезпечує рух діагностичного інструменту по базових траєкторіях, завдяки чому система демонструє гнучкість та можливість адаптації до різних типів і розмірів промислових автоклавів.

Автоматизована система сканування поверхні автоклаву зі сферичним паралельним механізмом функціонує під керуванням операторського інтерфейсу (HMI), який забезпечує введення параметрів сканування, відображення процесу, візуалізацію результатів та генерацію звітів. Центральний контролер здійснює загальне керування системою, координує роботу всіх компонентів та зберігає конфігураційні дані. Керування рухом діагностичного інструменту забезпечується модулем планування траєкторії, який обирає стратегію сканування, генерує точки траєкторії та оптимізує рух, а також модулем керування рухом СПМ, що вирішує задачу зворотньої кінематики, здійснює інтерполяцію руху та керує приводами. Робота діагностичного датчика, у якості якого може застосовуватися візуальна камера, ультразвуковий або лазерний сканер, контролюється окремим модулем керування датчиком, яка налаштовує параметри, запускає та зупиняє збір первинних даних. Приведення в рух СПМ, що складається з механічної платформи, приводів, ланок та шарнірів, здійснює блок керування приводами СПМ.

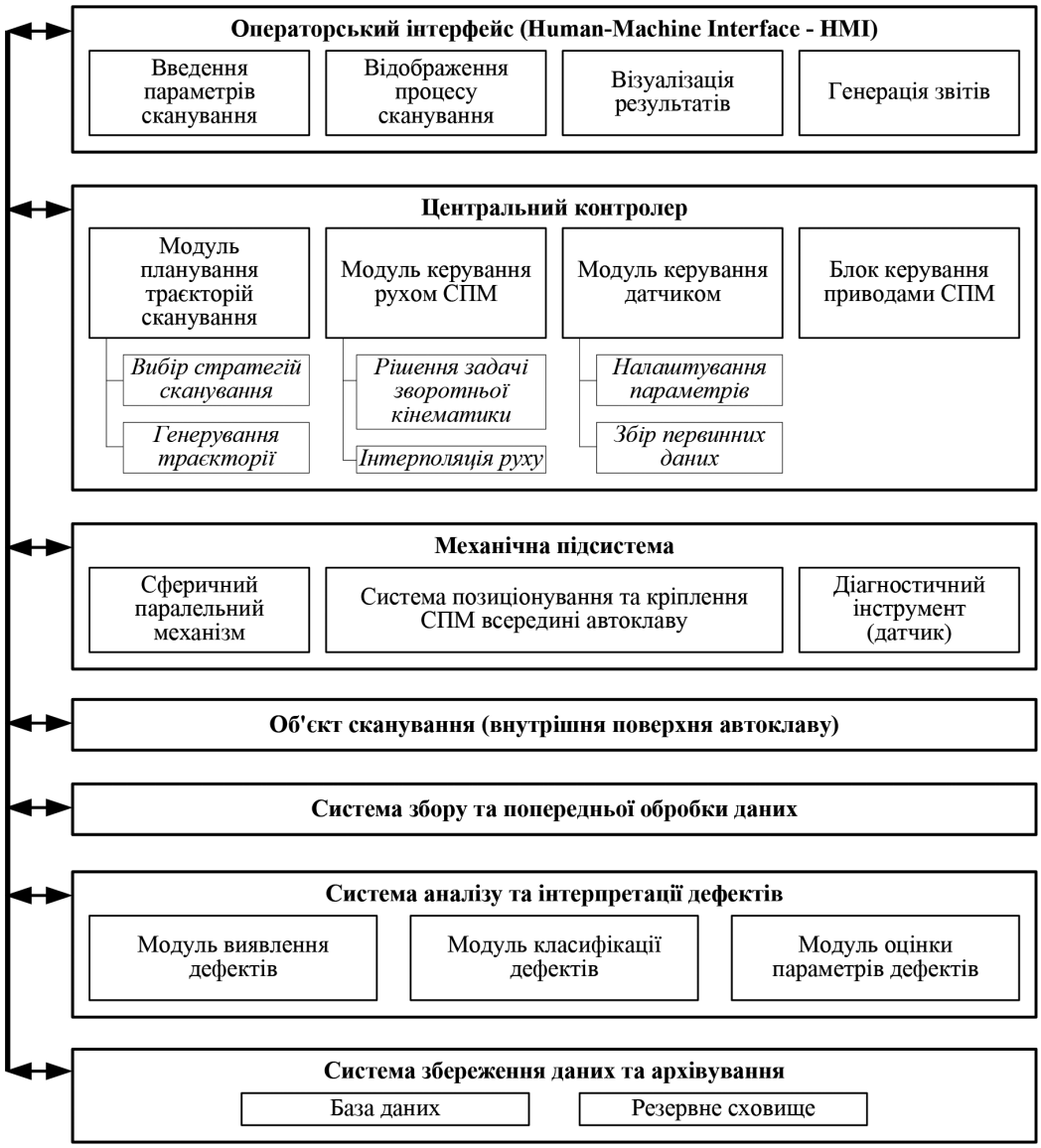


Рис. 6. Структура автоматизованої системи діагностики поверхонь автоклавів з використанням сферичного паралельного механізму

Отримані від датчика первинні дані надходять до системи збору та попередньої обробки даних, де відбувається фільтрація, калібрування та сегментація. Подальший аналіз та інтерпретація даних здійснюється для виявлення дефектів, їх класифікації та оцінки параметрів. На завершальному етапі система збереження даних та архівування забезпечує постійне та довгострокове зберігання сирих, оброблених і проаналізованих даних сканування, а також надає інструменти для пошуку, перегляду та експорту даних для подальшого аналізу та звітності про результати сканування внутрішньої поверхні автоклаву, яка є об’єктом дослідження.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило перспективність використання сферичного паралельного механізму в структурі автоматизованої системи діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів завдяки його високій маневреності та здатності орієнтувати діагностичний інструмент у широкому діапазоні кутів, що є важливим для сканування складних геометричних форм. Геометрія внутрішньої поверхні є визначальним фактором при виборі стратегії сканування. Мета діагностики (виявлення загальних дефектів, пошук конкретних типів дефектів, оцінка розмірів пошкоджень) визначає необхідну щільність сканування та складність траєкторії. У складних сценаріях діагностики може використовуватися комбінація розглянутих базових траєкторій або їх адаптація в режимі реального часу на основі даних, що надходять від датчика. При інтеграції СПМ в автоматизовані системи діагностики рухи СПМ повинні бути запрограмовані заздалегідь або генеруватися в режимі реального часу на основі даних від сенсорів. Для реалізації траєкторій сканування внутрішньої поверхні автоклава, обходу перешкод або фокусування на певних областях, необхідно постійно розраховувати зворотню задачу кінематики для визначення

потрібних положень приводів на кожному кроці руху. Розроблена автоматизована система діагностики з використанням СПМ демонструє гнучкість та можливість адаптації до різних типів і розмірів автоклавів. Перспективою подальших досліджень є розробка ефективних методів аналізу даних і оцінки параметрів дефектів для діагностики стану внутрішніх поверхонь промислових автоклавів.

Список використаної літератури

1. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження технічного регламенту обладнання, що працює під тиском»: прийнята 16 січня 2019 р. № 27. *Офіційний вісник України*. 2019. № 9. С. 90.

2. Поливода О. В. Лебеденко Ю. О. Ідентифікація систем автоматичного управління акустико-емісійною діагностикою. *Методи та прилади контролю якості*. 2020. № 1(44). С. 35–45. doi: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-35-45.

3. LaValle Steven M. Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2006. 1007 p.

4. Russell S J., Norvig P. Artificial intelligence a modern approach. Boston: Pearson, 2018. 1166 p.

5. Palmieri L., Koenig S., Arras Kai O. RRT-Based Nonholonomic Motion Planning Using Any-Angle Path Biasing. *Robotics and Automation (ICRA) 2016 Proceedings of the IEEE International Conference*. 2016. pp 2775–2781. doi:10.1109/ICRA.2016.7487439

6. Lebedenko Y., Polyvoda O., Derkachenko A., Modlo Y., Demishonkova S., Pylypenko Y. Research of Control Systems for Robotic Spatial Planning Platforms. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 2022. pp. 1–4. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005765

References

1. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy “Pro zatverdzhennia tekhnichnoho rehlamentu obladnannia, shcho pratsiuie pid tyskom”: pryiniata 16 sichnia 2019 r. № 27. *Ofitsiinyi visnyk Ukrainy*. (2019). № 9. S.90.

2. Polyvoda O. V. Lebedenko Yu. O. (2020). Identyfikatsiia system avtomatychnoho upravlinnia akustyko-emisiinoiu diahnostykoiu. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. № 1(44). S. 35–45. doi: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-35-45

3. LaValle Steven M. (2006) Planning Algorithms. Cambridge University Press. 1007 p.

4. Russell S J., Norvig P. (2018). Artificial intelligence a modern approach. Boston: Pearson. 1166 p.

5. Palmieri L., Koenig S., Arras Kai O. (2016). RRT-Based Nonholonomic Motion Planning Using Any-Angle Path Biasing. *Robotics and Automation (ICRA) 2016 Proceedings of the IEEE International Conference*. pp 2775–2781. doi: 10.1109/ICRA.2016.7487439

6. Lebedenko Y., Polyvoda O., Derkachenko A., Modlo Y., Demishonkova S., Pylypenko Y. (2022). Research of Control Systems for Robotic Spatial Planning Platforms. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. pp. 1–4. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005765

УДК 620.92 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.7

Д. О. ДМИТРІЄВ
професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

М. Ф. КУЗМІЧОВ
аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0003-1501-6865

ВПЛИВ ПОСТОБРОБКИ НА ЯКІСТЬ ДЕТАЛЕЙ В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

У статті проведено аналітичний огляд сучасних методів обробки поверхонь різноманітних матеріалів отриманих 3D-друком. Розглянуто окремо вплив механічної, абразивної, лазерної і хімічної видів пост обробки деталей в адитивному виробництві на вплив мікрогеометрії поверхонь, залишкових напружень, точності розмірів. Наведено класифікацію дефектів друку в технології Fused Deposition Modeling (FDM) та селективного лазерного спікання SLM для металів і сплавів у сучасному адитивному виробництві, проаналізовано останні дослідження у цій сфері.

Встановлено впливові технологічні фактори такі як потужність лазеру, швидкість сканування, час обробки, виконано порівняння методів лазерного і електрохімічного полірування. По сучасних джерелах науково технічної інформації визначено вплив режимно-технологічних параметрів пост обробки на забезпечення шорсткості поверхонь в адитивному виробництві. Зокрема, магнітореологічного методу оздоблення поверхонь після наплавлення, механічному різанні після FDM друку в залежності від кута орієнтації сопла головки друку до деталі у відношенні до кінцевої шорсткості поверхні за критерієм середнього арифметичного параметру Ra. Розглянуто процес зниження параметру шорсткості після лазерного полірування в двофакторній залежності від потужності та величини подачі лазеру при пост обробці металевих деталей. Виконано порівняння середовищ для методів хімічного і електрохімічного оздоблення, вплив їх складу, концентрації, температури, часу контактування щодо мікрорельєфу поверхні заготовки, що підтверджується даними сучасних наукових досліджень. Розроблено початкову класифікацію комбінованих методів як перспективного напряму в пост обробці адитивних технологій з визначенням їх технологічних чинників і режимних умов, обґрунтовано переваги та недоліки. Зроблено узагальнюючий аналіз технологічних параметрів пост обробки в адитивних технологіях їх доцільності для полімерних і окремо металевих матеріалів, сформульовано технічні рекомендації керування якістю поверхонь методами пост обробки.

Ключові слова: *адитивне виробництво, 3D-друк, температурно-технологічні умови, якість виробів.*

D. O. DMYTRIIEV
Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

M. F. KUZMICHOV
Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0003-1501-6865

NFLUENCE OF POST-MAKING ON THE QUALITY OF PARTS IN ADDITIVE MANUFACTURING

The article provides an analytical review of modern methods of surface treatment of various materials obtained by 3D printing. The influence of mechanical, abrasive, laser and chemical types of post-processing of parts in additive manufacturing on the influence of surface microgeometry, residual stresses, and dimensional accuracy is considered separately. The classification of printing defects in Fused Deposition Modeling (FDM) technology and selective laser sintering SLM for metals and alloys in modern additive manufacturing is presented, and the latest research in this area is analyzed.

Influential technological factors such as laser power, scanning speed, and processing time are established, and a comparison of laser and electrochemical polishing methods is made. According to modern sources of scientific and technical information, the influence of post-processing regime and technological parameters on ensuring surface

roughness in additive manufacturing is determined. In particular, the magnetorheological method of surface finishing after surfacing, mechanical cutting after FDM printing depending on the orientation angle of the print head nozzle to the part in relation to the final surface roughness according to the criterion of the arithmetic mean parameter Ra. The process of reducing the roughness parameter after laser polishing in a two-factor dependence on the power and laser feed rate during post-processing of metal parts is considered. A comparison of media for chemical and electrochemical finishing methods, the influence of their composition, concentration, temperature, and contact time on the microrelief of the workpiece surface is made, which is confirmed by the data of modern scientific research. An initial classification of combined methods as a promising direction in post-processing of additive technologies is developed with the definition of their technological factors and operating conditions, the advantages and disadvantages are substantiated. A general analysis of the technological parameters of post-processing in additive technologies and their feasibility for polymeric and separately metallic materials is made, and technical recommendations for surface quality control by post-processing methods are formulated.

Key words: *additive manufacturing, 3D printing, temperature-technological conditions, product quality.*

Постановка проблеми

Новітні технології адитивного виробництва, такі як 3D-друк мають інтенсивне застосування в промисловості у різних галузях, включаючи медицину, авіацію та автомобілебудування. Вважається, що основною перевагою таких методів є можливість швидкого створення складних геометричних форм із помірно мінімальними виробничими ресурсами. Однак на практиці, характеристики виготовлених деталей, такі як механічна міцність, точність розмірів або шорсткість поверхні, часто не відповідають очікуванням, що пов'язано з недостатнім вивченням фізичних явищ та технологічних умов адитивних технологій. В сучасних умовах недостатня увага до цього етапу призводить до виникнення дефектів, що ускладнює використання деталей у високотехнологічних сферах. Тому виникає важлива потреба комплексного дослідження впливу різних методів постобробки на кінцеві властивості продукції для підвищення якості деталей і розширення можливостей їх практичного застосування [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Адитивне виробництво різними матеріалами потребує усунення дефектів отриманих під час виготовлення до яких відносять «ефект сходів», великі агломерати сферичних розплавів (рис. 1) і ін.

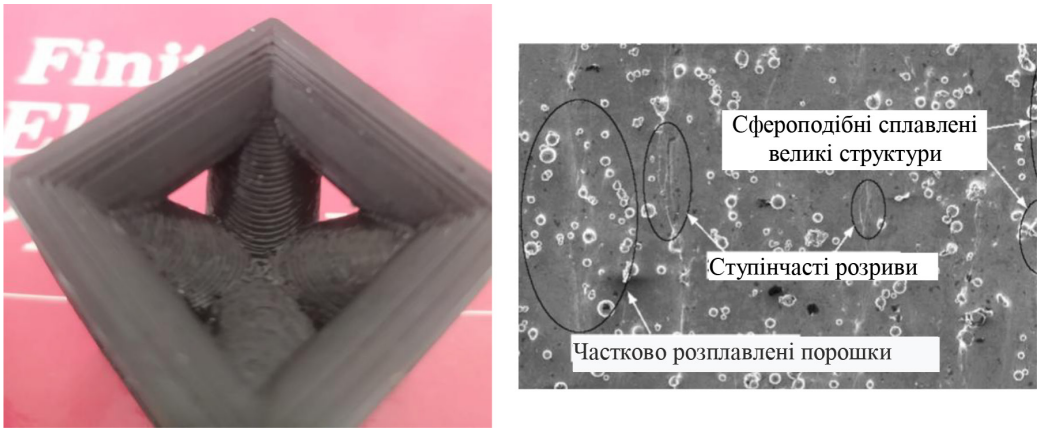


Рис. 1. Приклади в адитивних технологіях: а) – зовнішні дефекти типу «сходів»; внутрішні утворення після селективного лазерного плавлення металевих порошків

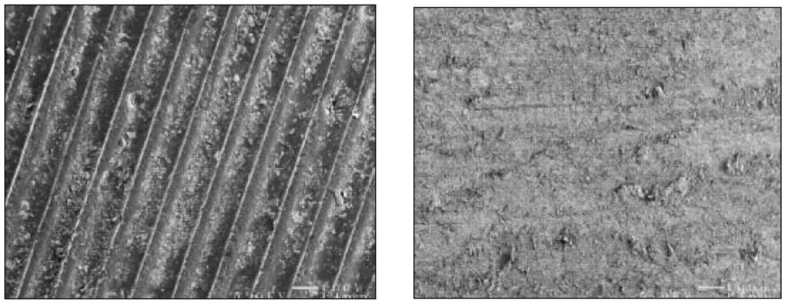
Аналізуючи сучасні дослідження [1, 5, 6, 10], можна виділити кілька основних аспектів впливу пост обробки. Механічна обробка (шліфування, фрезерування), покращує точність розмірів, але може вплинути на внутрішню структуру матеріалу. Термічна обробка використовується для зниження залишкових напружень, покращення механічних властивостей, але може спричинити зміну розмірів. Хімічна обробка як травлення або полірування підвищує якість поверхні, однак іноді негативно впливає на структурну цілісність. Фізичні методи такі як лазерна обробка, ультразвукове полірування забезпечують високу якість поверхні без значного впливу на розміри. Багато дослідників наголошують на необхідності комбінованих методів обробки для досягнення оптимальних результатів.

Метою цього дослідження є систематизація знань про вплив різних методів постобробки на якість деталей, виготовлених за допомогою адитивного виробництва. Основний акцент зроблено на вивченні таких аспектів: покращення поверхневих характеристик деталей, зменшення залишкових напружень у матеріалах, забезпечення довговічності та стабільності деталей при експлуатації, комбіновані методи для оптимізації процесів постобробки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Постобробка є невід'ємною складовою адитивного виробництва, яка значно впливає на якість готових деталей. Основні методи постобробки мають свої специфічні характеристики та впливають на різні аспекти продукції. Механічна обробка застосовується для покращення геометричної точності деталей та видалення залишків матеріалу. Найпоширенішими техніками є шліфування, фрезерування та полірування. Однак, надмірний механічний вплив може створювати мікротріщини, що впливають на довговічність матеріалу. Термічна обробка використовується для зняття залишкових напружень та покращення структурної цілісності деталей. Метод дозволяє уникати деформацій і забезпечувати стабільність форми. Термічні методи також допомагають підвищити ударну в'язкість та міцність матеріалів, особливо металевих сплавів. Хімічна обробка полягає у застосуванні розчинів для зниження шорсткості поверхні та підвищення її гладкості. Хімічне травлення використовується для полімерних деталей і забезпечує естетичний вигляд та функціональність. Водночас, довготривала дія хімічних реагентів може негативно впливати на механічні властивості матеріалу. Лазерна обробка спрямована на точкову обробку поверхонь для досягнення мінімальної шорсткості. Забезпечує високу точність і відсутність негативного впливу на основну структуру деталей. Особливо ефективна для металевих деталей, які потребують високого рівня фінішної обробки. Комбіновані методи – поєднання кількох технік, таких як термічна та лазерна обробка, дозволяє отримувати оптимальні характеристики продукції.

Сучасним методом абразивної постобробки та оздоблення поверхонь полімерних деталей є абразивно-струменева обробка [2]. Використовують два типи абразивів, такі як оксид алюмінію і скляні шарики. В роботі [3] досліджували розмір зерен, орієнтацію поверхні та тиск як вони впливають на шорсткість поверхні (рис. 2).



а б

Рис. 2. Вигляд поверхонь деталей отриманих методом стереолітогафії після абразивно-струменевої оброки [3]

В багатьох роботах досліджувались параметри тиску струменю абразиву, відстані і часу струменевої обробки але відзначалося відсутність гнучкості при такому виді оздоблення для деталей складних форм. Як альтернативу розроблено абразивні методи з зануренням надрукованої деталі в абразивне середовище для фінішної обробки. Таким є фінішна обробка в контейнері з деталлю в середині барабану, що обертається (рис. 3, *а*). В порівнянні з цим в наукових публікаціях зазначається, що ефективним є оздоблення поверхонь серед групи процесів механічної абразивної обробки є магнітореологічна обробка (рис. 3, *б*) [4].

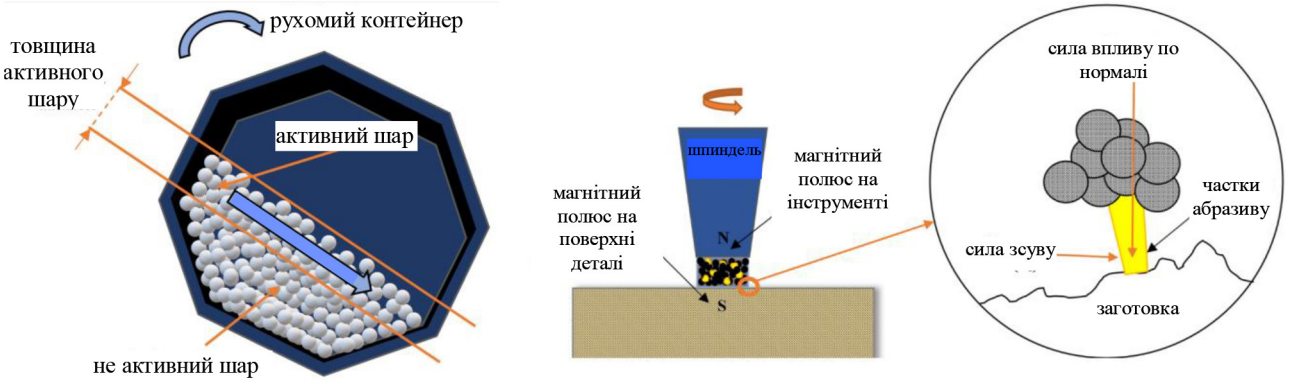


Рис. 3. Метод пост обробки в вільному абразивному середовищі (а), схема процесу магніто-реологічного оздоблення (б)

Постобробці різанням нагрітим різаком полімерних деталей присвячено роботу авторів [5]. В даному дослідженні на сонові параметричних залежностей розроблено алгоритм розрахунку глибини різання в залежності кута профілю друкованої деталі з їх впливом на отриману шорсткість поверхні (рис. 4).

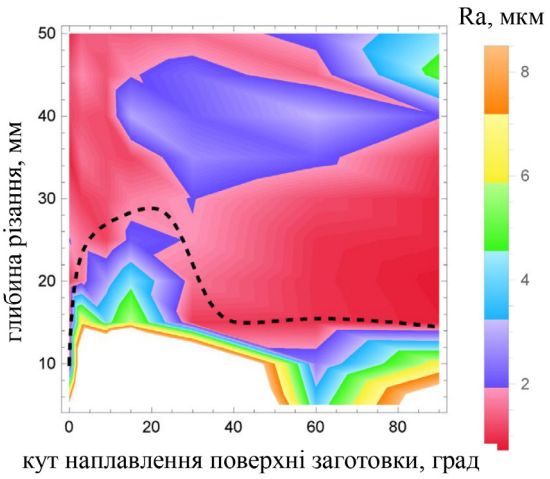
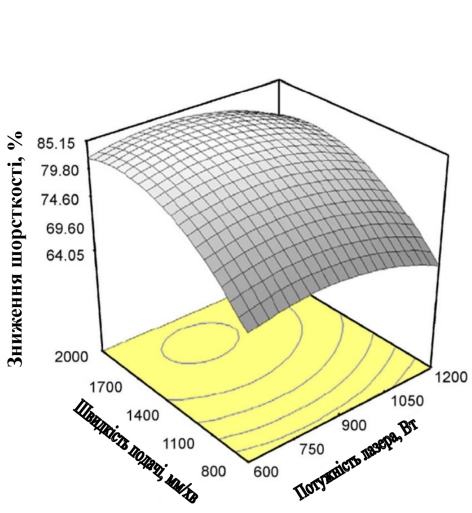


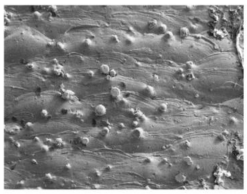
Рис. 4. Шорсткість поверхні як функція кута наплавлення і глибини різання [5]

Лінія пунктиром, що проходить крізь зону параметру глибини різання, забезпечує найменшу шорсткість. При тестовій обробці надрукованої деталі параметр Ra в випадкових зонах поверхні знизився з 50,61, 25,42 і 16,53 мкм до 1,91, 1,66 і 1,52 мкм, відповідно.

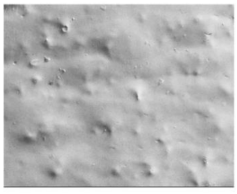
Стосовно лазерної пост обробки друкованих деталей існує не багато напрацювань через низьку температуру плавлення полімерів. В цілому лазерне полірування застосовують для металевих деталей отриманих шляхом селективного лазерного плавлення або спікання порошків на столі для друку [5]. Так лазерне полірування вивчалось в роботі [6] для деталей виготовлених методом FDM. Було встановлено, що шорсткість поверхні не залежить від щільності енергії лазера і при мінімальній щільності енергії (потужність 0,75 Вт і швидкість подачі 180 мм/с) параметр шорсткості Ra майже не змінився. На відміну від полімерних матеріалів лазерне оздоблення металевих виробів отриманих шляхом селективного лазерного плавлення або спікання порошків в доповнення до ефекту «сходів» додається велика агломерація порошків. На рис. 5 показано експериментально отриману залежність шорсткості металевих виробів в залежності від потужності лазера та подачі [7].



а)



стан поверхні до полірування



стан поверхні після полірування

б)

Рис. 5. Приклади впливу параметрів лазерного (а) та електрохімічного (б) полірування на шорсткість поверхні металевих деталей отриманих адитивними технологіями [11]

В дослідженнях [8, 9, 10] вивчалось полірування лазером друкованих сталевих деталей та встановлено,що збільшення потужності лазера с 1 до 3 Вт з одночасним зменшенням швидкості сканування с 5 до 1 мм/с значно покращує шорсткість поверхні. Кількість сканувань від 1 до 4 призводить до зменшення шорсткості поверхні та гомогенізації при тому,що подальше сканування призводить до утримання тріщин, що є негативним ефектом лазерного полірування за рахунок збільшення твердості з 281 HV до 509–558 HV. В поверхневих шарах спостерігаються залишкові напруження розтягу на рівні 926 МПа, а мікротвердість на поверхні збільшується на 25 %.

Поширеним способом постобробки деталей отриманих адитивними технологіями є електрохімічне та хімічне оздоблення [11]. Науково підтвердженими даними про ефективність промислового застосцвання є використання розчину сірчаної кислоти з етанолом в якості електрохімічного середовища (рис. 5, *б*).

В результаті аналізу сучасних методів постобробки адитивних технологій сформульовано їх первинні характеристики (табл. 1).

Таблиця 1

Узагальнення переваг і недоліків кожного методу постобробки

Метод постобробки	Переваги	Недоліки
Механічна обробка	Покращення точності розмірів; видалення залишків матеріалу	Можливе виникнення мікротріщин
Термічна обробка	Зниження залишкових напружень; покращення механічних характеристик	Мінімальні спотворення розмірів
Хімічна обробка	Досягнення високої гладкості поверхні	Зниження міцності на розтягнення при тривалій обробці
Лазерна обробка	Максимальна гладкість поверхні; усунення дефектів	Висока вартість обладнання
Комбіновані методи	Оптимальні характеристики за всіма параметрами	Складність реалізації; потреба в додаткових ресурсах

Висновки

В результаті дослідження встановлено переваги і недоліки методів постобробки деталей отриманих адитивними технологіями в залежності від матеріалу та властивостей процесу друку. Розглянуто основні технологічні параметри постобробки механічними, лазерними, хімічними, електрохімічними, термічними і комбінованими методами, зокрема їх вплив за критеріями якості готових виробів таких як точність геометричних форм та розмірів готових виробів, шорсткість обробленої поверхні, мікротвердість поверхневого шару, рівень залишкових напружень. Параметричні залежності та властивості матеріалів, що отримано в результаті аналітичного огляду існуючого науково-технічного досвіду постобробки в адитивних технологіях можуть бути використані для удосконалення окремих технологічних процесів машинобудівного виробництва.

Список використаної літератури

1. Wang, Z., Ummethala, R., Singh, N., Tang, S., Suryanarayana, C., Eckert, J., & Prashanth, K. G. (2020). Selective Laser Melting of Aluminum and Its Alloys. Materials, 13(20), 4564. https://doi.org/10.3390/ma13204564

2. Leong, K. F., Chua, C. K., Chua, G. S., & Tan, C. H. (1998). Abrasive jet deburring of jewellery models built by stereolithography apparatus (SLA). Journal of Materials Processing Technology, 83, 36–47. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00041-7

3. Williams, R. E., & Melton, V. L. (1998). Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes. Rapid Prototyping Journal, 4, 56–67. https://doi.org/10.1108/13552549810207279

4. Kumar, A., Alam, Z., Khan, D. A., & Jha, S. (2019). Nanofinishing of FDM fabricated components using ball end magnetorheological finishing process. Materials and Manufacturing Processes, 34, 232–242. https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1512136

5. Boschetto, A., Bottini, L., & Veniali, F. (2016). Finishing of fused deposition modeling parts by CNC machining. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 41, 92–101. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.03.004

6. Dewey, M. P., & Ulutan, D. (2017). Development of laser polishing as an auxiliary post-process to improve surface quality in fused deposition modeling parts. Proceedings of the ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, Los Angeles, CA, USA, 4–8 June 2017. American Society of Mechanical Engineers, 50732, V002T01A006.

7. Lamikiz, A., Sánchez, J., de Lacalle, L. L., & Arana, J. (2007). Laser polishing of parts built up by selective laser sintering. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, 2040–2050. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.01.013

8. Zhou, J., Liao, C., Shen, H., & Ding, X. (2019). Surface and property characterization of laser polished Ti6Al4V. Surface & Coatings Technology, 380, 125016. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125016

9. Cernaš ˙ ejus, O., Škamat, J., Markoviˇ c, V., Višniakov, N., & Indriši ¯ unas, S. (2019). Surface laser processing of additive manufactured 1.2709 steel parts: Preliminary study. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 7029471. https://doi.org/10.1155/2019/7029471

10. Temmler, A., Liu, D., Preußner, J., Oeser, S., Luo, J., Poprawe, R., & Schleifenbaum, J. (2020). Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11. Materials & Design, 192, 108689. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108689

11. Baicheng, Z., Xiaohua, L., Jiaming, B., Junfeng, G., Pan, W., Chen-Nan, S., Muiling, N., Guojun, Q., & Jun, W. (2017). Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing. Materials & Design, 116, 531–537. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.103

References

1. Wang, Z., Ummethala, R., Singh, N., Tang, S., Suryanarayana, C., Eckert, J., & Prashanth, K. G. (2020). Selective Laser Melting of Aluminum and Its Alloys. Materials, 13(20), 4564. https://doi.org/10.3390/ma13204564

2. Leong, K. F., Chua, C. K., Chua, G. S., & Tan, C. H. (1998). Abrasive jet deburring of jewellery models built by stereolithography apparatus (SLA). Journal of Materials Processing Technology, 83, 36–47. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00041-7

3. Williams, R. E., & Melton, V. L. (1998). Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes. Rapid Prototyping Journal, 4, 56–67. https://doi.org/10.1108/13552549810207279

4. Kumar, A., Alam, Z., Khan, D. A., & Jha, S. (2019). Nanofinishing of FDM fabricated components using ball end magnetorheological finishing process. Materials and Manufacturing Processes, 34, 232–242. https://doi.org/10.1080/10426914.2018.1512136

5. Boschetto, A., Bottini, L., & Veniali, F. (2016). Finishing of fused deposition modeling parts by CNC machining. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 41, 92–101. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.03.004

6. Dewey, M. P., & Ulutan, D. (2017). Development of laser polishing as an auxiliary post-process to improve surface quality in fused deposition modeling parts. Proceedings of the ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, Los Angeles, CA, USA, 4–8 June 2017. American Society of Mechanical Engineers, 50732, V002T01A006.

7. Lamikiz, A., Sánchez, J., de Lacalle, L. L., & Arana, J. (2007). Laser polishing of parts built up by selective laser sintering. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, 2040–2050. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.01.013

8. Zhou, J., Liao, C., Shen, H., & Ding, X. (2019). Surface and property characterization of laser polished Ti6Al4V. Surface & Coatings Technology, 380, 125016. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125016

9. Cernaš ˙ ejus, O., Škamat, J., Markoviˇ c, V., Višniakov, N., & Indriši ¯ unas, S. (2019). Surface laser processing of additive manufactured 1.2709 steel parts: Preliminary study. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 7029471. https://doi.org/10.1155/2019/7029471

10. Temmler, A., Liu, D., Preußner, J., Oeser, S., Luo, J., Poprawe, R., & Schleifenbaum, J. (2020). Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11. Materials & Design, 192, 108689. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108689

11. Baicheng, Z., Xiaohua, L., Jiaming, B., Junfeng, G., Pan, W., Chen-Nan, S., Muiling, N., Guojun, Q., & Jun, W. (2017). Study of selective laser melting (SLM) Inconel 718 part surface improvement by electrochemical polishing. Materials & Design, 116, 531–537. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.103

УДК 621.311 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.8

Н. Л. ДОН
кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9503-5326

І. Ф. ПОГРЕБНЯК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-0935-1168

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МЕРЕЖЕВОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОЇ СТОЯНКИ

У статті представлено результати моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції на прикладі автомобільної стоянки відкритого типу тривалого зберігання «Maxi Parking» для кліматичних умов м. Гданськ (Польща) та визначено доцільність впровадження такої системи на практиці. Використання програмного забезпечення дозволяє отримати річну загальну кількість електричної енергії та річну питому кількість електричної енергії.

Фотоелектричні модулі встановлено на даху сонячного навісу суцільним масивом під кутом нахилу покрівлі, при цьому враховувалися можливості оптимального використання поверхонь для встановлення фотоелектричних модулів. За допомогою програмного середовища HelioScope розроблено дизайн для трьох варіантів конфігурації мережевої фотоелектричної станції, які відрізняються потужностями стрінгових інверторів, виконане порівняння запропонованих варіантів та складено структурну електричну схему; проведено моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції. Визначено структуру втрат в системі фотоелектричної станції, що враховує втрати в інверторах, втрати в мережі постійного струму, втрати в мережі змінного струму, втрати через затінення чи забруднення фотоелектричних модулів, зменшення потужності фотоелектричного модуля через його перегрівання тощо. За запропонованим варіантами визначено загальні технічні показники мережевої фотоелектричної станції та усереднене значення генерації електричної енергії фотоелектричною станцією в мережу впродовж року з урахуванням втрат в складових системи.

Визначені техніко-економічні показники системи, такі як оцінка простого терміну окупності, дисконтований термін окупності з урахуванням дисконтування грошових потоків. За отриманими результатами термін окупності складає два роки, що є прийнятним для аналогічних проєктів.

Ключові слова: *автомобільна стоянка, сонячний навіс, фотоелектричні модулі, мережевий інвертор, HelioScope, моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції.*

N. L. DON
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy, Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-9503-5326

I. F. POGREBNIAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy, Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-0935-1168

MODELING THE OPERATION OF A GRID PHOTOELECTRIC STATION FOR A CAR PARK

The article presents the results of modeling the operation of a grid photovoltaic station using the example of an open-type long-term storage car park «Maxi Parking» for the climatic conditions of the city of Gdansk (Poland) and determines the feasibility of implementing such a system in practice. The use of software allows you to obtain the annual total amount of electrical energy and the annual specific amount of electrical energy. Photovoltaic modules are installed on the roof of a solar canopy in a continuous array at the angle of inclination of the roof, taking into account the possibilities of optimal use of surfaces for installing photovoltaic modules. Using the HelioScope software environment, a design was developed

for three configuration options for a grid photovoltaic station, which differ in the power of string inverters, a comparison of the proposed options was made and a structural electrical diagram was drawn up; the operation of the grid photovoltaic station was simulated. The structure of losses in the photovoltaic station system has been determined, which takes into account losses in inverters, losses in the DC network, losses in the AC network, losses due to shading or contamination of photovoltaic modules, reduction in the power of the photovoltaic module due to its overheating, etc. According to the proposed options, the general technical indicators of the network photovoltaic station and the average value of the generation of electrical energy by the photovoltaic station into the network during the year, taking into account losses in the system components, have been determined.

The technical and economic indicators of the system have been determined, such as the assessment of the simple payback period, the discounted payback period taking into account the discounting of cash flows. According to the results obtained, the payback period is two years, which is acceptable for similar projects.

Key words: *car park, solar canopy, photovoltaic modules, grid inverter, HelioScope, modeling of a grid photovoltaic station.*

Постановка проблеми

Стимулювання розосередженої генерації з використанням відновлюваних джерел енергії досить повно розглянуто в Четвертому енергетичному пакеті ЄС [1,2].

Директива ЄС про енергетичну ефективність будівель прописує, що з початку 2027 року встановлення фотоелектричних модулів буде обов'язковим для всіх нових нежитлових будівель, а з 2030 року – для всіх нових житлових будівель. У директиві зазначено, що фотоелектричні модулі повинні бути встановлені, якщо це технічно можливо, а також економічно та функціонально доцільно. Нові правила також вимагають, аби всі автомобільні стоянки певної місткості використовували сонячну енергію, щоб мінімізувати вплив яскравого освітлення автомобільних стоянок на навколишнє середовище. Переобладнати стоянки місткістю від 80 до 400 місць необхідно до 2028 року, більшим паркінгам – до липня 2026 року. Цей захід спрямований на скорочення викидів вуглекислого газу та прискорення переходу на відновлювані джерела енергії [1,2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Принцип роботи сонячних навісів простий, але ефективний – це конструкції, призначені для розміщення фотоелектричних модулів, що перетворюють енергію сонячного випромінювання на електричну енергію, яку можна витрачати на власні потреби автомобільної стоянки (освітлення, живлення автоматизованих систем контролю паркування, охорони та сигналізації), можна використовувати для заряджання електромобілів чи продавати надлишки в центральну електромережу. Додатковою перевагою таких фотоелектричних систем є те, що вони не змінюють цільове призначення земельних ділянок, на яких встановлені [1].

Існують різні типи сонячних навісів для автомобілів, адаптованих до потреб і характеристик автомобільних стоянок, на яких вони встановлені. Основні види навісів із фотоелектричними модулями наведено на рис. 1 [3].

«Maxi Parking» (м. Гданськ, Польща) – автомобільна стоянка відкритого типу тривалого зберігання площею 3,4 га, яка повністю вимощена, огороджена, освітлена та охороняється (рис. 2) [5].

Споживання електричної енергії автомобільною стоянкою складає близько 10 000 кВт·год щомісяця. Базова ціна на електричну енергію для польських непобутових споживачів складає 142,06 € / МВт·год. Відповідно, власник автомобільної стоянки в середньому має щомісяця сплачувати за спожиту електроенергію понад 14 000 €. Зважаючи на вражаючу суму в платіжках (понад 170 тис. євро щороку) за електричну енергію, актуальним є питання покриття витрат на власне споживання та отримання прибутку від реалізації надлишку електричної енергії фотоелектричною станцією, встановленою на автомобільній стоянці [5].

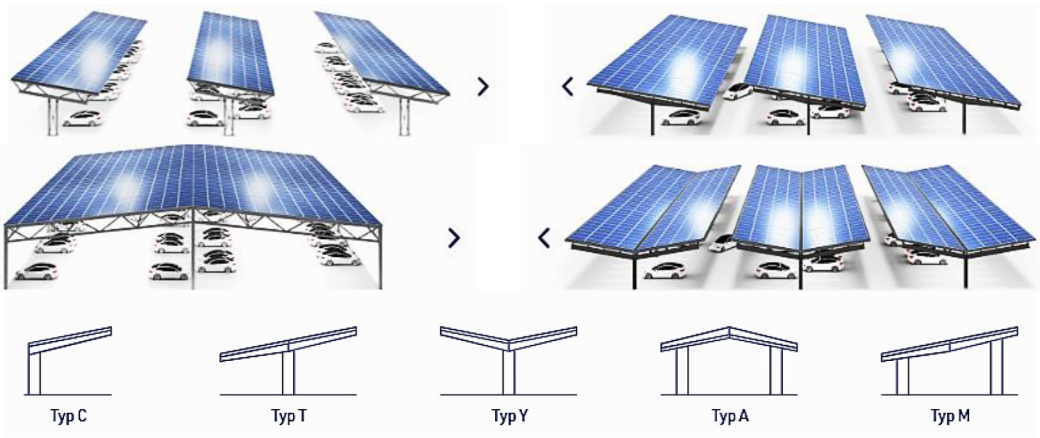


Рис. 1. Основні види навісів із фотоелектричними модулями [3]

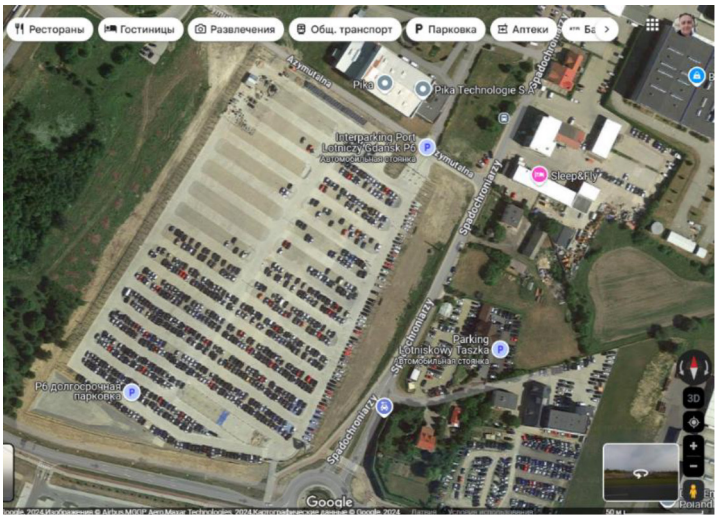


Рис. 2. Автомобільна стоянка «Maxi Parking», м. Гданськ (Польща) [5]

Для прогнозування генерації електричної енергії фотоелектричною станцією слід провести моделювання її роботи з використанням програмного забезпечення, яке дозволяє отримати річну загальну кількість електричної енергії та річну питому кількість електричної енергії. Як свідчать дослідження, програмне середовище HelioScope показав вагомі результати моделювання роботи як мережевих, так і автономних фотоелектричних станцій [4].

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції для автомобільної стоянки в програмному середовищі HelioScope та визначення доцільності впровадження такої системи на практиці.

Викладення основного матеріалу дослідження

На площадці автомобільної стоянки передбачено розміщення сонячних навісів з блоками фотоелектричних модулів Trina Solar, TSM-PD14 320 B – найбільш поширеної в HelioScope потужності модуля, використання якої дозволить обгрунтувати доцільність встановлення фотоелектричної станції для автомобільної стоянки [6].

Фотоелектричні модулі встановлено на даху сонячного навісу суцільним масивом під кутом нахилу покрівлі із врахуванням можливості оптимального використання поверхонь для встановлення фотоелектричних модулів.



Рис. 3. Звіт з моделювання дизайну мережевої фотоелектричної станції для автомобільної стоянки, візуалізовано в HelioScope [6]

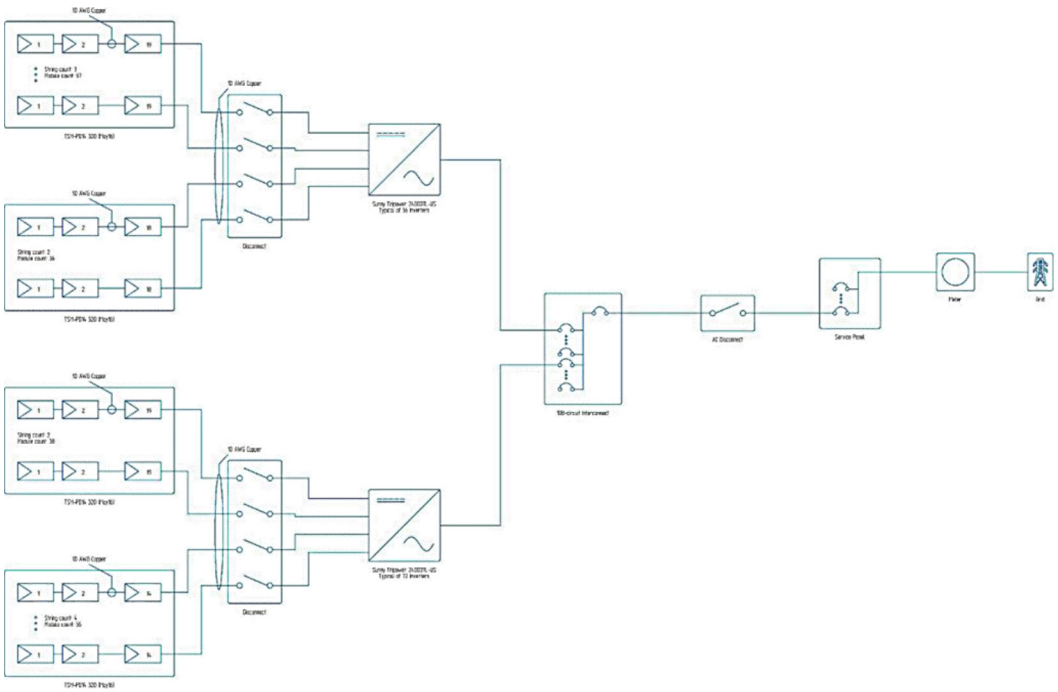


Рис. 4. Структурна схема фотоелектричної станції, візуалізовано в HelioScope [6]

Для перетворення постійного струму в змінний струм прийнято стрингові трифазні мережеві інвертори. В рамках даного дослідження проведено порівняння трьох варіантів конфігурації станції, які відрізняються потужностями стрінгових інверторів [6]:

варіант 1 – Sunny Tripower 24000TL-US (SMA);

варіант 2 – SUN2000-40KTL-M3 (Huawei);

варіант 3 – SUN2000-150K-MG0 (Huawei).

В програмному середовищі HelioScope розроблено дизайн для зазначених варіантів конфігурації мережевої фотоелектричної станції (рис. 3) та складено її структурну схему (рис. 4).

Для прогнозування генерації електричної енергії мережевою фотоелектричною станцією для автомобільної стоянки «Maxi Parking» проведено моделювання її роботи в HelioScope [6].

Визначено структуру втрат в системі фотоелектричної станції, що враховує втрати в інверторах, втрати в мережі постійного струму, втрати в мережі змінного струму, втрати через затінення чи забруднення фотоелектричних модулів, зменшення потужності фотоелектричного модуля через його перегрівання тощо [6].

Прогноз генерації електричної енергії фотоелектричною станцією враховував її типові компоненти (фотоелектричні модулі, інвертори тощо), а також місцеві метеорологічні умови [6]. Визначено загальні технічні показники мережевої фотоелектричної станції за варіантами (табл. 1) та усереднене значення генерації електричної енергії фотоелектричною станцією в мережу впродовж року з урахуванням втрат в складових системи (рис. 5).

Як показало дослідження, найкращим серед розглянутих варіантів проєкту мережевої фотоелектричної станції для автомобільної стоянки у м. Гданськ (Польща) є варіант 3 – на базі стрінгових інверторів SUN2000-150K-MG0 (Huawei) та фотоелектричних модулів TRINA SOLAR, TSM-PD14 320 Вт. Оцінка простого терміну окупності

Таблиця 1

Загальні технічні показники станції за варіантами

Параметр	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Фотоелектричні модулі, шт. Trina Solar, TSM-PD14 320 (320 Вт)	10 116	10 116	10 116
Інвертор мережевий, шт.			
Sunny Tripower 24000TL-US (SMA)	108		
SUN2000-40KTL-M3 (Huawei)		65	
SUN2000-150K-MG0 (Huawei)			18
Номінальна потужність, МВт	2,6	2,6	2,7
Ефективність перетворення, %	86,1	86,4	86,3
Продуктивність, кВт·год/кВт·пік	913,1	916,4	915,6
Разом за рік	2 955 728,1	2 966 387,3	2 963 885,6

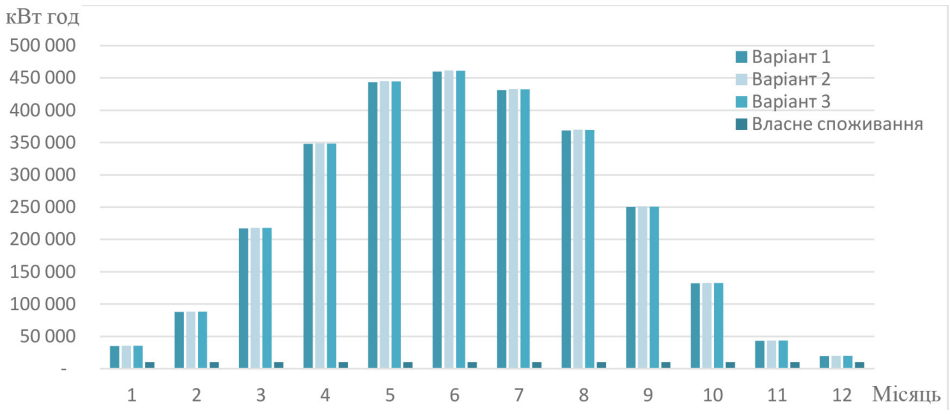


Рис. 5. Генерація електричної енергії в мережу фотоелектричною станцією

показала, що проєкт повністю окупиться вже через два роки після введення мережевої фотоелектричної станції в експлуатацію залежно від обраного варіанту. Дисконтований термін окупності з урахуванням дисконтування грошових потоків за проєктом складає два роки, що є прийнятним для аналогічних проєктів.

Висновки

За результатами моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції для автомобільної стоянки в програмному комплексі HelioScope визначено доцільність впровадження такої системи на практиці.

Сонячні навіси для автомобілів є ідеальним рішенням для оптимізації паркувального простору, генерації зеленої енергії та одночасного захисту транспортних засобів. У зв'язку з падінням цін на комплектуючі, переваги встановлення сонячного навісу для автомобілів виходять за рамки простого виробництва енергії. Вони підвищують цінність нерухомості, забезпечують затінену парковку та сприяють екологічній стійкості [1].

Список використаної літератури

1. Revolutionizing Parking Lots: The Rise of Commercial Solar Carparks [Electronic resource]. Access mode: https://www.kingfeels.com/blog/revolutionizing-parking-lots-the-rise-of-commercial-solar-carparks_b29 (last access: 01.05.2025). Title from the screen.

2. Empower Your Solar Structure Projects With Advance Design [Electronic resource]. Access mode: https://graitec.com/uk/solar-structure-projects-with-graitec-advance-design/ (last access: 01.05.2025). Title from the screen.

3. Solar Carport Structures Comprehensive Guide [Electronic resource]. Access mode: https://pv-mounts.com/solar-carport-structures-comprehensive-guide/ (last access: 24.10.2024). Title from the screen.

4. Don N. Simulation modeling of the operation of an industrial grid-connected photovoltaic power plant of ground type / N. Don, I. Pogrebniak, O. Chepelyuk, K. Varenyk, O. Haiko // Actual Problems Of Modern Science 2024. Bydgoszcz–Khmelnytskyi, 2024r. – P. 130–139.

5. Maxiparking – najtańszy parking przy lotnisku Gdańsk [Electronic resource]. Access mode: https://maxiparking.pl/ (last access: 01.05.2025). Title from the screen.

6. HelioScope: Advanced Solar Design Software [Electronic resource]. Access mode: https://app.helioscope.com/projects/4618093/reports/15472442 (last access: 01.05.2025). Title from the screen.

References

1. Revolutionizing Parking Lots: The Rise of Commercial Solar Carparks [Electronic resource]. Access mode: https://www.kingfeels.com/blog/revolutionizing-parking-lots-the-rise-of-commercial-solar-carparks_b29 (last access: 01.05.2025). Title from the screen.

2. Empower Your Solar Structure Projects With Advance Design [Electronic resource]. Access mode: https://graitec.com/uk/solar-structure-projects-with-graitec-advance-design/ (last access: 01.05.2025). Title from the screen.

3. Solar Carport Structures Comprehensive Guide [Electronic resource]. Access mode: https://pv-mounts.com/solar-carport-structures-comprehensive-guide/ (last access: 24.10.2024). Title from the screen.

4. Don N. Simulation modeling of the operation of an industrial grid-connected photovoltaic power plant of ground type / N. Don, I. Pogrebniak, O. Chepelyuk, K. Varenyk, O. Haiko // Actual Problems Of Modern Science 2024. Bydgoszcz–Khmelnytskyi, 2024r. – P. 130-139.

5. Maxiparking – najtańszy parking przy lotnisku Gdańsk [Electronic resource]. Access mode: https://maxiparking.pl/ (last access: 01.05.2025). Title from the screen.

6. HelioScope: Advanced Solar Design Software [Electronic resource]. Access mode: https://app.helioscope.com/projects/4618093/reports/15472442 (last access: 01.05.2025). Title from the screen.

УДК 621.313.333.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.9

В. О. ЗУБЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної
та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічного університет
ORCID: 0000-0002-8401-755X

Р. В. ТЕЛЮТА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4923-1227

СИСТЕМА ЗАХИСТУ ТА МОНІТОРИНГУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФУНКЦІЄЮ АВАРІЙНОГО ВІДКЛЮЧЕННЯ

У статті розглянуто питання підвищення надійності, енергоефективності та ресурсоощадності роботи трифазних асинхронних електродвигунів шляхом розробки та впровадження інтегрованої системи захисту і моніторингу з функцією аварійного відключення. Актуальність теми зумовлена високим рівнем відмов електродвигунів у промисловому секторі, особливо в умовах агропромислового комплексу, де щорічно виходить з ладу до 25 % парку електроприводів, здебільшого при неповному навантаженні (40–60 % від номінального).

Запропоновано концепцію побудови автоматизованої системи, яка базується на безперервному контролі ключових експлуатаційних параметрів: фазних струмів, температури обмоток статора та частоти обертання ротора. Система не лише фіксує критичні відхилення в роботі двигуна, але й здатна ініціювати аварійне відключення та передати інформацію до SCADA-системи вищого рівня керування. У центрі діагностичної моделі – два інформативні показники: коефіцієнт втрат активної енергії (kпе), який відображає енерговитрати двигуна в умовах відхилення від номінального режиму, та коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції (kвр), що враховує теплове старіння ізоляційної системи.

У ході дослідження проведено моделювання різних режимів навантаження та впливу температури навколишнього середовища на ресурс ізоляції електродвигуна типу 4А100S2У3. Показано, що підвищення температури з 20 °С до 40 °С при незмінному навантаженні спричиняє зростання коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції з 0,19 до 0,7. Це вказує на суттєве прискорення процесів теплового старіння і підтверджує важливість термоконтролю в умовах експлуатації.

Результати дослідження демонструють доцільність впровадження системи моніторингу, яка дозволяє у реальному часі оцінювати технічний стан електродвигуна, прогнозувати залишковий ресурс ізоляції та своєчасно приймати рішення щодо обслуговування чи зупинки приводу. Запропонований підхід сприяє зменшенню аварійності, підвищенню енергоефективності виробничих процесів і забезпеченню сталого функціонування електроприводних систем.

Ключові слова: *асинхронний електродвигун, моніторинг, захист, ізоляція, коефіцієнт витрати ресурсу, коефіцієнт втрат активної енергії, теплове старіння, ресурсоенергозбереження, SCADA, аварійне відключення.*

V. O. ZUBENKO
PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Hydraulic Engineering Construction, Water and Electrical Engineering
Kherson State Agrarian and Economic University
ORCID: 0000-0002-8401-755X

R. V. TELIUTA
PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electrical Systems
and Energy Management
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0002-4923-1227

PROTECTION AND MONITORING SYSTEM FOR AN INDUCTION MOTOR WITH EMERGENCY SHUTDOWN FUNCTION

The article addresses the issues of improving the reliability, energy efficiency, and resource conservation in the operation of three-phase squirrel-cage induction motors through the development and implementation of an integrated protection and monitoring system with an emergency shutdown function. The relevance of the topic is driven by the high failure rate of electric motors in the industrial sector, particularly in the agro-industrial complex, where up to 25 % of the motor fleet fails annually, mostly under partial load conditions (40–60 % of nominal).

A concept for the design of an automated system is proposed, based on continuous monitoring of key operational parameters: phase currents, stator winding temperature, and rotor speed. The system not only detects critical deviations in motor operation but can also initiate emergency shutdown and transmit data to a higher-level SCADA control system. At the core of the diagnostic model are two informative indicators: the active power loss coefficient (kne), which reflects energy consumption under non-nominal operating conditions, and the insulation resource consumption coefficient (kвр), which accounts for thermal aging of the motor's insulation system.

The study involved modeling different load profiles and analyzing the influence of ambient temperature on the insulation resource of an induction motor type 4A100S2U3. It was shown that increasing the ambient temperature from 20 °C to 40 °C, while maintaining the same load, leads to an increase in the insulation resource consumption coefficient from 0.19 to 0.7. This indicates a significant acceleration of thermal aging processes and highlights the importance of temperature monitoring during operation.

The results confirm the feasibility of implementing a monitoring system that enables real-time assessment of the motor's technical condition, prediction of the remaining insulation life, and timely decision-making regarding maintenance or shutdown. The proposed approach helps reduce failure rates, improve energy efficiency in industrial processes, and ensure the sustainable operation of electric drive systems.

Key words: *induction motor, monitoring, protection, insulation, insulation resource consumption coefficient, active power loss coefficient, thermal aging, resource and energy efficiency, SCADA, emergency shutdown.*

Постановка проблеми

Трифазний асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором є одним з найпоширеніших типів електричних двигунів, який застосовується в різних виробничих галузях для приводу різноманітних механізмів та устаткування. Однією з основних проблем, які існують на потокових технологічних лініях агропромислового комплексу, є відмова 20–25 % наявного парку асинхронних електродвигунів щороку, при тому, що завантаження електродвигунів в нормальних режимах роботи становить лише 40–60 % їх потужності. Це має негативні наслідки, такі як незаплановані витрати на зупинку технологічних ліній, ремонт асинхронних електродвигунів і додаткові втрати електроенергії.

Серед основних завдань енергетичної стратегії України при вступі в ЄС є забезпечення сталого розвитку енергетики та зменшення негативного впливу на довкілля шляхом зменшення споживання енергії та підвищення ефективності використання ресурсів.

Асинхронні електродвигуни (АСД) займають провідне місце серед електромеханічних пристроїв у промисловості завдяки своїй надійності, простоті конструкції та широкому діапазону застосування. Однак у процесі експлуатації вони піддаються впливу ряду негативних факторів, таких як перевантаження, перегрів, порушення фазності, зниження напруги та інші нештатні режими, які можуть призвести до передчасного зносу або повної відмови двигуна.

Традиційні методи захисту двигунів, зокрема струмові реле чи теплові захисти, не завжди забезпечують своєчасне реагування на динамічні зміни робочих параметрів. Крім того, відсутність централізованого моніторингу ускладнює контроль за станом двигуна в режимі реального часу, що суттєво знижує ефективність експлуатації електрообладнання.

В умовах розвитку автоматизованих систем управління та цифрових технологій виникає потреба у створенні комплексної системи захисту та моніторингу АСД, яка б не лише забезпечувала оперативний контроль струмів, температури та частоти обертання, а й мала можливість автоматичного аварійного відключення двигуна при виявленні критичних параметрів, із подальшою передачею даних до SCADA-системи підприємства.

Таким чином, актуальним є питання розробки інтегрованої системи захисту та моніторингу асинхронного двигуна, здатної підвищити надійність та безпеку експлуатації електроприводних установок в умовах промислового середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження та публікації, щодо зменшення втрат в ізоляції асинхронного двигуна, зосереджені на застосуванні нових матеріалів для ізоляції, розробці методів діагностики та прогнозування стану ізоляції, та оптимізації процесу виробництва. Так серед українських дослідників проблемою покращення якості ізоляції асинхронних двигунів займались Серебрякова О. С, Чернишова В. О., Автаєва М. О., роботи яких стосувались вивченню методів неруйнівного контролю технічного стану ізоляції за електричними явищами. В роботах

Губаревич О. В., Голубєвої С. М. [3], запропоновано проводити класифікацію дефектів ізоляції з урахуванням їх походження. Серед закордонних досліджень можна виділити [4], роботи яких присвячені розробці ізоляційних матеріалів на основі епоксидних смол та наночастинок оксиду кремнію, використання яких дозволяє знизити втрати в ізоляції та збільшити надійність асинхронних двигунів. В роботі [5], досліджувалась можливість використання газового фазування для поліпшення якості ізоляції, що дозволить знизити втрати в ізоляції та забезпечити більшу надійність асинхронних двигунів.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка та обгрунтування структури й принципів функціонування інтегрованої системи захисту та моніторингу асинхронного двигуна з функцією аварійного відключення, яка забезпечує своєчасне виявлення нештатних режимів роботи за основними експлуатаційними параметрами (струм, температура, частота обертання) та передбачає можливість автоматичної зупинки двигуна з передачею інформації до системи верхнього рівня (SCADA).

Викладення основного матеріалу дослідження

Підвищення ефективності та ресурсоенергозбереження асинхронних електродвигунів може бути досягнуте шляхом впровадження сучасних систем моніторингу і захисту, які дозволяють забезпечити оптимальні умови експлуатації обладнання. Одним із ключових напрямів є контроль технічного стану двигунів у режимі реального часу, що дає змогу своєчасно реагувати на відхилення основних параметрів та запобігати розвитку аварійних ситуацій.

До заходів, що сприяють ефективній роботі електродвигунів, належать:

- використання енергоефективних моделей двигунів високих класів (наприклад, IE3 або IE4), які мають знижені втрати;
- оптимізація робочих режимів шляхом автоматичного регулювання навантаження, швидкості обертання та режимів пуску/зупинки відповідно до змін у технологічному процесі;
- регулярне технічне обслуговування, а також систематичний контроль температурного режиму, струмів споживання і частоти обертання ротора.

Важливим фактором експлуатаційної надійності асинхронних двигунів є стан їх ізоляції, зокрема ізоляції обмоток. Пошкодження ізоляції не лише скорочує термін служби обладнання, але й значно підвищує витрати енергії через неконтрольовані втрати струму. Відсутність об'єктивного моніторингу цього параметра часто призводить до раптових відмов електродвигунів без видимих попереджувальних ознак.

Впровадження автоматизованої системи захисту та моніторингу з функцією аварійного відключення дозволяє виявляти критичні стани на ранніх етапах, знижуючи імовірність аварій та незапланованих простоїв. Така система забезпечує комплексний контроль параметрів двигуна, що дає змогу не лише підвищити енергоефективність виробництва, але й продовжити термін служби електрообладнання.

На основі проведених досліджень встановлено два ключові показники, що дозволяють оцінити режими роботи асинхронного електродвигуна з погляду ресурсо- та енергозбереження. Перший – коефіцієнт втрат активної енергії ($к_{не}$) – відображає рівень енергетичних втрат у процесі експлуатації. Другий – коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції ($к_{вр}$) – характеризує інтенсивність старіння ізоляційного матеріалу обмоток двигуна.

Функціональну структуру системи діагностування асинхронного електродвигуна з урахуванням критеріїв ресурсоенергозбереження подано на рис. 1.

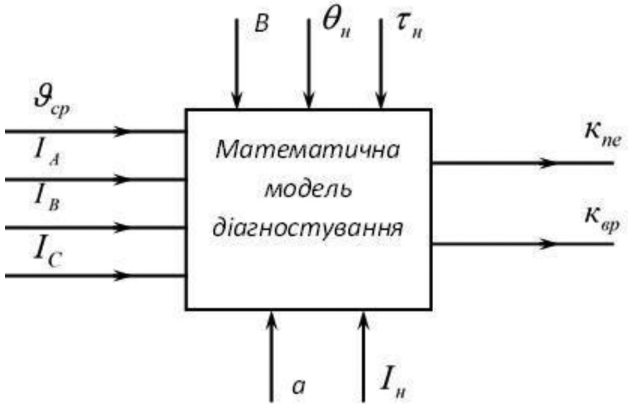


Рис. 1. Функціональна структура системи моніторингу параметрів асинхронного електродвигуна на основі математичної моделі діагностування

На схемі зображено функціональну взаємодію вхідних та вихідних параметрів системи моніторингу, що реалізується на основі математичної моделі діагностування асинхронного електродвигуна.

До вхідних величин належать:

I_A, I_B, I_C – фазні струми двигуна, А;

B – параметр, який характеризує клас ізоляції, K;

$\theta_н$ – номінальна абсолютна температура ізоляції, K;

$\tau_н$ – номінальне перевищення температури ізоляції, °С;

$\vartheta_{ср}$ – температура навколишнього середовища, °С;

a – коефіцієнт втрат асинхронного електродвигуна (відношення втрат у сталі до втрат у міді при номінальному режимі роботи);

$I_н$ – номінальне значення сили електричного струму, А.

На виході моделі формуються діагностичні коефіцієнти:

Кпе – коефіцієнт втрат активної енергії;

Квр – коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції.

Ці показники дозволяють оцінити поточний стан двигуна, виявити ознаки перевантаження, перегріву чи інших відхилень, а також використовуються для прийняття рішень у системі захисту або вищого рівня керування (наприклад, SCADA).

Коефіцієнт втрат активної енергії являє собою відношення втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні до номінальних, тобто чим менше втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні, тим менше коефіцієнт втрат активної енергії

Коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції являє собою відношення швидкості зношення ізоляції в заданому режимі робот до номінального значення швидкості зношення ізоляції.

Дослідимо більш детально коефіцієнт витрати ресурсу ізоляції. Під час експлуатації електродвигуни, і їх ізоляційна система, піддаються різним впливам, які можна розділити на два основні класи: режимні і кліматичні впливи.

Режимні впливи – це впливи, пов'язані з режимом роботи електродвигуна і способом його використання (завантаження, частота пуску і зупинки, переривчаста робота, несиметричність напруги і т.д.), що можуть спричинити перевантаження обмоток і перегрів, та призвести до пошкодження ізоляцію, і навіть до її втрати.

Кліматичні впливи – впливи, пов'язані з умовами середовища, в якому електродвигун працює (вологість, пил і забруднення, температура, інтенсивність опадів, агресивні хімічні речовини або інші атмосферні фактори), що мають негативний вплив на ізоляцію електродвигуна, та можуть призвести до утворення ізоляційних пробоїв і збільшення ризику короткого замикання.

Серед різних факторів, що визначають термін служби ізоляції електричних машин, одним з основних є теплове старіння. При аналізі експлуатаційних режимів особливого значення набувають методи розрахунку швидкості теплового старіння електричної ізоляції й визначення строку її служби.

У якості об'єкта дослідження було обрано асинхронний електродвигун типу 4А100S2У3. Для оцінки теплового зношення ізоляції протягом однієї години роботи в умовах квазісталого режиму було використано заданий графік навантаження. Температура навколишнього середовища при цьому приймалася сталою й дорівнювала 30 °С.

З метою дослідження впливу послідовності зміни навантаження у часі було змодельовано кілька варіантів його перестановки. Це дозволило порівняти результати теплового зношення ізоляції при однакових навантаженнях, але різному порядку їх прикладання. Окремо розглянуто варіант, у якому реальний графік навантаження був замінений на еквівалентне середньоквадратичне значення.

У результаті моделювання отримано залежності коефіцієнта витрати ресурсу ізоляції від коефіцієнта завантаження електродвигуна та температури навколишнього середовища. Аналіз цих залежностей показав, що за наявності інформації про навантаження та температуру можна створити ефективну систему діагностування теплового стану двигуна. Така система дозволяє своєчасно оцінювати ступінь зношення ізоляції й запобігати аварійним відмовам обладнання.

Для забезпечення надійної та безпечної експлуатації асинхронних двигунів (АСД) у промислових умовах було розроблено систему контролю, яка дозволяє здійснювати моніторинг критичних параметрів двигуна в реальному часі та реалізовувати захист із можливістю аварійного відключення.

Система захисту та моніторингу асинхронного двигуна з функцією аварійного відключення складається з таких основних функціональних блоків: блоку вимірювання струмів споживання; блоку вимірювання частоти обертання ротора з використанням тахогенератора для обчислення ковзання; блоку індикації стану двигуна, що сигналізує про режими «норма», «перегрів» та «перевантаження»; системи аварійного відключення, яка автоматично або за командою вищого рівня вимикає двигун у разі виявлення критичних параметрів; а також блоку передачі інформації до SCADA-системи для віддаленого моніторингу та аналізу роботи обладнання.

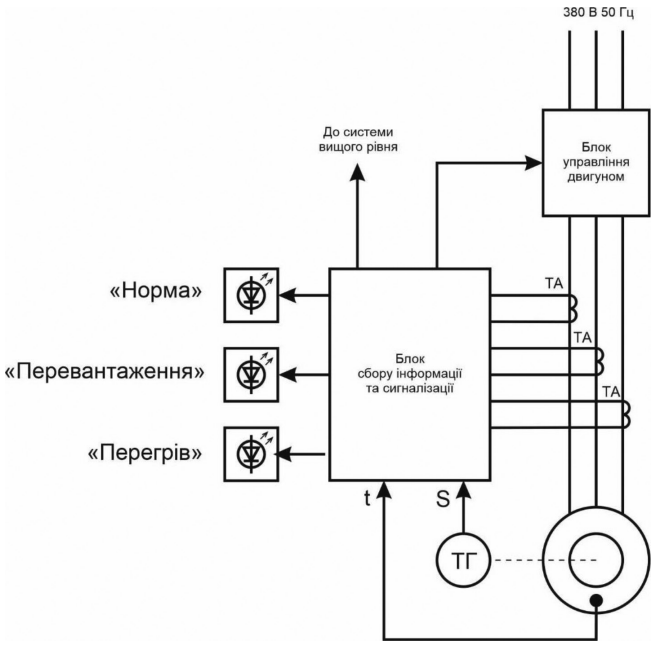


Рис. 2. Система захисту та моніторингу асинхронного двигуна з функцією аварійного відключення

Системою здійснюється контроль таких параметрів двигуна:

- Струми споживання (по фазах);
- Температура статора;
- Частота обертання.

У блоці вимірювання струмів споживання реалізується безперервний контроль електричних навантажень, які споживає асинхронний двигун у кожній з фаз. Для цього застосовуються трансформатори струму (ТА), що забезпечують ізольовану подачу сигналів на вхід контролера. Дані обробляються за допомогою аналого-цифрового перетворювача, після чого здійснюється аналіз на предмет виявлення відхилень від нормативних режимів, таких як перевантаження, міжфазна нерівномірність чи обрив фази. Окрім цього, за допомогою сигналів від ТА визначається частота мережі живлення, що є основою для розрахунку синхронної частоти двигуна. Це, у свою чергу, є ключовим етапом у визначенні ковзання, що характеризує ефективність роботи електропривода.

У блоці контролю температури статора встановлений термодатчик (термоопір або терморезистор), який інтегрується безпосередньо в обмотки статора двигуна. Цей датчик забезпечує постійний моніторинг температури обмоток, що дозволяє оперативно реагувати на перегрів і уникати пошкоджень ізоляції або міжвиткових замикань. У випадку перевищення допустимих температурних значень система автоматично формує аварійний сигнал типу «перегрів», що може призвести до блокування живлення двигуна для запобігання подальшому нагріванню і виходу з ладу.

У блоці вимірювання частоти обертання ротора використовується тахогенератор або цифровий енкодер, що встановлюється на валу двигуна. Завдяки цим пристроям фіксується реальна частота обертання ротора. Порівнюючи ці дані з частотою живлення мережі, система розраховує значення ковзання (S) – відносного відставання ротора від синхронного обертання. Це дозволяє оцінити ступінь навантаження на валу двигуна та ідентифікувати критичні ситуації, такі як пробуксовка ротора, перевантаження або заклинювання механізмів, що можуть призвести до серйозних пошкоджень електропривода.

У блоці індикації стану двигуна передбачено відображення поточного режиму роботи за допомогою світлових індикаторів, які встановлюються на панелі оператора або щиті керування. Зокрема, індикатор «Норма» сигналізує про справну та безпечну роботу двигуна, «Перегрів» – про критичне підвищення температури статора, а «Перевантаження» – про надмірне споживання струму. Така індикація дозволяє оперативно оцінити ситуацію навіть без доступу до SCADA або цифрових інтерфейсів.

У системі аварійного відключення реалізовано механізм автоматичного знеструмлення двигуна у разі виявлення критичних відхилень параметрів, що можуть призвести до аварійної ситуації або виходу з ладу електрообладнання. Управляючий сигнал генерується контролером і подається на виконавчий елемент – контактор, реле або силовий блок, який миттєво відключає живлення двигуна. Цей процес може бути ініційований як локально (автоматично), так і дистанційно – з вищого рівня керування (наприклад, із SCADA-системи або системи диспетчерського контролю).

У блоці передачі даних на SCADA-систему реалізовано функцію централізованого моніторингу та аналізу зібраної інформації. Усі параметри – значення струмів, температура, частота обертання, сигнали тривоги та

аварій – передаються цифровим каналом зв'язку до диспетчерської служби або серверного центру підприємства. Це дозволяє забезпечити глибоку аналітику, формування трендів, звітність, а також реалізувати віддалене керування та прийняття рішень щодо подальшої експлуатації обладнання.

Запровадження такої багатофункціональної системи захисту та моніторингу дозволяє підвищити рівень безпеки електроприводів, знизити ризики аварій, продовжити ресурс асинхронних двигунів, а також забезпечити ефективне технічне обслуговування на основі об'єктивних даних у реальному часі. Це особливо актуально для об'єктів із безперервними технологічними процесами, де зупинка обладнання може призвести до значних економічних втрат.

Висновки

У результаті дослідження запропоновано підхід до діагностування стану асинхронного електродвигуна з урахуванням ресурсо- та енергозберігаючих критеріїв. Встановлено, що швидкість теплового старіння ізоляції експоненційно залежить від температури та визначається такими параметрами, як коефіцієнт втрат активної енергії, коефіцієнт завантаження та температура навколишнього середовища. Для двигуна типу 4А100S2У3 підвищення температури з 20 °С до 40 °С призводить до зростання коефіцієнта витрат ресурсу ізоляції з 0,19 до 0,7. Результати підтверджують ефективність розробленої системи моніторингу, яка дозволяє оцінювати залишковий ресурс ізоляції в режимі реального часу та підвищує надійність і енергоефективність електроприводів.

Список використаної літератури

1. Телюта Р. В. Принципи побудови моделі дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні / Р. В. Телюта, С. П. Плешков // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.-2017. Вип. 30. С. 188–196. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2017_30_28

2, Худий Є. Г. Сучасні методи діагностики стану ізоляції електричних машин /Є. Г. Худий, І. І. Пельтек// Сб. научн. трудов «Вестник НТУ «ХПИ»: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. № 28. Вестник НТУ «ХПИ», 2010. С. 549–550. ISSN 2079-8024.

3. Губаревич О. В., Голубєва С. М. Систематизація дефектів і вибір методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів: Тези доповідей ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Мехатронні системи: інновації та інжиніринг», 10 жовтня 2019 р. / відп. за вип. М. А. Зенкін. – Київ: КНУТД, 2019. – 176 с. С. 65–67.

4. K. I. Kutsyy, O. V. Klymchuk, V. S. Kravchenko, and V. V. Ponomarenko, «Development of insulation materials based on epoxy resins and silicon dioxide nanoparticles for induction motors,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 4, pp. 4076-4082, July-Aug. 2021.

5. A. J. Akhtar, H. Borsi, A. Cavallini, R. Hackam, and D. Mazzetti, "Gas insulated motor design: A review", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 28, no. 1, pp. 1-12, Feb. 2021.

References

1. Teliuta, R. V., & Pleshkov, S. P. (2017). *Principles of constructing a model for studying active power losses in an induction motor*. Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University: Engineering in Agricultural Production, Sectoral Mechanical Engineering, Automation, (30), 188–196. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2017_30_28

2. Khudyy YE. H. Pel′tek I. I. (2010), "Modern methods of diagnostics of the state of insulation of electric machines", Sb. nauchn. trudov "Vestnyk NTU "KHPY": Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teoriya i praktyka, Vestnyk NTU "KHPY", Vol. 28, pp. 549–550. ISSN 2079-8024.

3. Hubarevych O. V. and Holubyeva S. M. (2019), "Systematization of defects and choice of methods of diagnostics of the technical state of insulation of induction motors". Tezy dopovidey III Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi "Mekhatronni systemy: innovatsiyi ta inzhynirynh" [Abstracts of the III International Scientific-Practical Conference "Mechatronic Systems: Innovations and Engineering"], Kyyiv : KNUTD, October 10, 2019, pp. 65–67.

4. K. I. Kutsyy, O. V. Klymchuk, V. S. Kravchenko, and V. V. Ponomarenko (2021), "Development of insulation materials based on epoxy resins and silicon dioxide nanoparticles for induction motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 4, pp. 4076–4082, July-Aug. 2021.

5. A. J. Akhtar, H. Borsi, A. Cavallini, R. Hackam, and D. Mazzetti (2021), "Gas insulated motor design: A review", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 28, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2021.

УДК 621.7 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.10

О. В. КАНІВЕЦЬ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4364-8424

В. В. ДУДНИК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6553-2951

І. М. КАНІВЕЦЬ
кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри будівництва та професійної освіти
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-1670-5553

Н. М. ОПАРА
кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
професор кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-0128-8400

Ю. В. ШКЛЯР
аспірант кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0002-4695-1664

ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ШЛЯХОМ ОБКАТКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

Висока ефективність технологій зміцнення методом поверхневої пластичної деформації у поєднанні з продуктивністю та економічною доцільністю робить їх привабливими для широкого ряду промислових галузей. На даний час сучасна пластична теорія ще не запропонувала повного розв'язання задачі взаємодії пружного інструмента з тілом, що піддається пружно-пластичній деформації, у випадку, коли обидві поверхні мають довільну кривизну. Метою даного дослідженнях є розробка математичної моделі, яка б дозволяла обґрунтовано визначати оптимальні режими поверхневої пластичної деформації циліндричних деталей при заданих показниках чистоти поверхні. Дослідження показали, що показники шорсткості, подачі та діаметри кульок інденторів взаємопов'язані між собою. Величина подачі суттєво впливає на стан обробленої поверхні. Із зростанням подачі збільшується інтервал між вершинами мікронерівностей, а кількість повторних натискань на одну й ту ж ділянку зменшується, що призводить до підвищення шорсткості та зменшення глибини і рівня наклепу. Зростання подачі у 15 разів збільшує шорсткість поверхні на два класи. У свою чергу, глибина наклепаного шару зменшилась у 2,5 раза, а ступінь наклепу в знизився на 11 %. Таким чином, аналіз результатів показав доцільність оптимальних значень подачі для сталі 45, що становить 0,05 мм/кульку. Під час обкатування сталевих поверхонь підвищення навантаження покращує характеристики наклепу. Із зростанням тиску шорсткість поверхні залишається на рівні Ra 0,2 мкм, при цьому глибина наклепу для сталі 45 збільшується із 0,9 до 1,8 мм, а ступінь наклепу в середньому підвищується на 11 %. Під час збільшення діаметрів кульок зміцнювального інструмента, за інших незмінних умов, спостерігається незначне зниження шорсткості поверхні, а також зменшення глибини та ступеня наклепу. Таким чином, із збільшенням діаметра кульок збільшується клас чистоти обробки поверхні, однак глибина та інтенсивність наклепаного шару знижується на незначну величину.

Ключові слова: *поверхневе зміцнення, ППД, обкатування, шорсткість, подача.*

O. V. KANIVETS
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical
and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0003-4364-8424

V. V. DUDNYK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical
and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6553-2951

I. M. KANIVETS
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Civil Engineering
and Professional Education
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-1670-5553

N. M. OPARA
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Mechanical
and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-0128-8400

YU. V. SHKLYAR
Postgraduate Student at the Department of Mechanical
and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0002-4695-1664

SUBSTANTIATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF SURFACE HARDENING BY RUNNING-IN OF CYLINDRICAL SURFACES

The high efficiency of surface plastic deformation hardening technologies combined with their productivity and economic feasibility make them attractive for a wide range of industrial sectors. At present, modern plastic theory has not yet offered a complete solution to the problem of interaction between an elastic tool and a body subjected to elastic-plastic deformation in the case when both surfaces have arbitrary curvature. The aim of this study is to develop a mathematical model that would allow us to reasonably determine the optimal modes of surface plastic deformation of cylindrical parts at given surface finish indicators. The study showed that the roughness, feed rate, and diameters of indenter balls are interrelated. The feed rate significantly affects the condition of the machined surface. As the feed rate increases, the interval between the vertices of the micron irregularities increases, and the number of repeated presses on the same area decreases, resulting in an increase in roughness and a decrease in the depth and level of the scratch pattern. Increasing the feed rate by 15 times increases the surface roughness by two classes. In turn, the depth of the deposited layer decreased by 2.5 times, and the degree of adhesion decreased by 11 %. Thus, the analysis of the results showed the feasibility of the optimal feed rate for steel 45, which is 0.05 mm/ball. When running-in steel surfaces, an increase in load improves the peening characteristics. With increasing pressure, the surface roughness remains at Ra 0.2 μm, while the depth of the peening for steel 45 increases from 0.9 to 1.8 mm, and the degree of peening increases by 11 % on average. When ball diameters are increased, with all other conditions remaining constant, a slight decrease in surface roughness is observed, as well as a decrease in the depth and degree of peening by 48 % and 11 %, respectively. Thus, with an increase in the diameter of the balls, the surface finish class increases, but the depth and intensity of the riveted layer decreases by a small amount.

Key words: *surface hardening, SPD, rolling, roughness, feed.*

Постановка проблеми

Надійність і тривалість служби машинних компонентів значною мірою залежать від стану їх поверхневого шару, який відіграє ключову роль як носій конструктивних, технологічних і експлуатаційних концентраторів напружень. Саме ці зони впливу та їх характеристики, здебільшого, визначають імовірність втомного руйнування

під час функціонування обладнання. З найважливіших експлуатаційних показників поверхневого шару слід виділити ступінь шорсткості, твердість, а також величину залишкових напружень.

Необхідні показники якості поверхні, а також більшість ключових експлуатаційних характеристик деталей машин можуть бути досягнуті шляхом зміцнення за допомогою технологій поверхневої пластичної деформації (ППД), які дають змогу максимально реалізувати внутрішній потенціал матеріалу. Застосування ППД сприяє підвищенню твердості поверхневих шарів, формуванню в них стискальних залишкових напружень, а також покращенню мікрогеометричних властивостей поверхні. У результаті, залежно від призначення деталі та умов її експлуатації, значно зростає опір до втомного руйнування, зношування, корозійного впливу, покращується герметичність і здатність утримувати мастильні матеріали.

Під час проведення операцій ППД найчастіше виникають складнощі технологічної сфери, зокрема визначення оптимальних режимів обробки. Від коректного вибору цих параметрів залежить не лише ефективне використання потенціалу міцності матеріалу деталей, а і досягнення необхідних характеристик поверхні. Як правило, режими обробки підбираються емпіричним шляхом – на основі результатів досліджень зразків або, рідше, реальних деталей, що оброблялись у різних умовах. Такий підхід не завжди забезпечує бажаний результат. Саме тому в умовах сучасного виробництва, особливо на етапі проєктування технологічного процесу їх виготовлення, варто застосовувати методику визначення режимів зміцнювальної обкатки, яка не тільки гарантує формування у валах заданої системи залишкових стискальних напружень, а й дозволяє керувати цією системою відповідно до конкретних вимог експлуатації. Отже, розробка такої методики є цілком обґрунтованою та своєчасною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Висока ефективність технологій зміцнення методом ППД у поєднанні з продуктивністю та економічною доцільністю робить їх привабливими для широкого спектра промислових галузей – від точної приладобудівної техніки до важкого машинобудування, у тому числі і сільськогосподарського. Перелік машинобудівних компонентів, які піддаються обробці методом ППД, є надзвичайно широким, причому основна частка таких деталей припадає на виробництво автотракторної та авіаційної техніки, сільськогосподарських машин і важкого промислового обладнання.

Пошуки оптимальних режимів поверхневої пластичної деформації активно продовжуються як в Україні, так і за кордоном. Паралельно вдосконалюються технології та інструментальне забезпечення, а також впроваджуються класичні і новітні методи обробки. Варто відзначити праці Ауліна В. В. [1], Сідашенка О. І. [2], Афтаназіва І. С. [3], Сердюка О. В. [4], Дуднікова А. А. [5] та ін. науковців. Відповідно до механічної концепції формування поверхневого шару, запропонованої Сошко В. О. [6] та Савуляком В. В. [7], процес ППД розглядається як пластичне переміщення металу, при якому структура поверхні формується відповідно до численних деформацій. Ця теорія базується на вивченні закономірностей хвильового характеру пластичних змін, нерівномірного та переривчастого накопичення деформацій і пошкоджень (у тому числі мікроструктурних), а також кінематичних особливостей взаємодії інструмента із заготовкою. Подібну методологію застосував Михалевич В. М. [8] при створенні математичної моделі залишкових напружень, які виникають у поверхневому шарі після ППД. Окремі положення даної теорії були успішно використані у роботі [9] для аналізу процесів обробки валів із використанням обкочуванням роликами. Наукову цінність мають дослідження Zhao J. [10], присвячені підвищенню ефективності технологічних систем ППД із вільно переміщуваними інденторами. Окрему увагу заслуговує робота [11] Лавріненко Н. М. та колективу авторів, у якій, на основі методу скінченних елементів за допомогою програмного середовища Ansys, розв'язуються задачі утворення залишкових напружень у циліндричних деталях із зонами концентрації напружень з урахуванням специфіки механічних властивостей поверхневого шару.

На даний час сучасна пластична теорія ще не запропонувала повного розв'язання задачі взаємодії пружного інструмента з тілом, що піддається пружно-пластичній деформації, у випадку, коли обидві поверхні мають довільну кривизну. Таке рішення мало б враховувати не лише зміцнення матеріалу за межами пружного стану, а й особливості перебігу процесу при значних обсягах пластичної деформації [12]. У зв'язку з цим, відсутній точний та обґрунтований аналіз опору матеріалів у зонах контактної пружно-пластичної взаємодії з урахуванням механічних характеристик і умов навантаження [13]. Не визначено як окремі компоненти інтенсивності такої деформації пов'язані між собою та не встановлено чіткої залежності між ними й залишковими напруженнями в осередку деформації. Існують розбіжності в уявленнях про механізми виникнення цих напружень, а також про наявність їх максимумів, які, як вважається, розміщені на певній глибині під поверхнею – хоча й самі дані про цю глибину є суперечливими.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка математичної моделі, яка б дозволяла обґрунтовано визначати оптимальні режими поверхневої пластичної деформації циліндричних деталей при заданих показниках чистоти поверхні.

Викладення основного матеріалу дослідження

У машинобудуванні широко застосовується метод обробки шляхом обкатування кульками, що дозволяє покращити стійкість деталей до втомного руйнування, зменшити зношування та підвищити твердість зовнішнього шару. Його використовують для обробки поверхонь циліндричної і плоскої форми, а також канавок, галтелей та фасонних ділянок. Важливо, що перед застосуванням прокатування ці ділянки проходять попередню обробку шляхом різання.

Одна із задач методу накатування полягає у роботі інденторів у виді кульок, що вирівнюють мікронерівності поверхні деталі циліндричної форми, які залишились після попередніх технологічних операцій обробки. У процесі впливу кульок на поверхню деталі, виступи частково видаляються або вдавлюються вглиб, заповнюючи собою заглибини рельєфу. Внаслідок цього відбувається помітне зниження висоти мікронерівностей, а отриманий мікрорельєф характеризується меншими переходами між виступами й впадинами, підвищеною рівномірністю, значним співвідношенням між кроком і висотою нерівностей, а також великими радіусами заокруглення. Така форма мікронерівностей сприяє збільшенню реальної площі контакту поверхні, що, у свою чергу, знижує питоме навантаження в зоні спряження деталей. Крім того, рельєф із плавними переходами і великими радіусами сприяє ефективному утриманню мастильного матеріалу в зоні контакту.

Величина пластичної деформації, яка безпосередньо впливає на ступінь зміцнення металу в процесі обкатки, залежить від наступних факторів:

– прикладеного тиску індентора до оброблюваної поверхні, тобто питоме навантаження;
– конструктивних особливостей індентора, включаючи його форму та геометричні параметри;
– хімічних та фізичних характеристик матеріалу деталі;
– початкового рівня шорсткості поверхні перед обробкою;
– величини подачі;
– швидкості здійснення процесу.

Зусилля деформування P та контактний питомий тиск p під час проведення поверхневої пластичної обробки відображають інтенсивність силового впливу індентора на поверхню деталі. Величина зусилля, а також його напрям визначаються характером розподілу контактних нормальних напружень і мають вирішальне значення для зміни фізико-механічних властивостей оброблюваного шару.

Вибір зусилля обкатування визначається рядом чинників, серед яких фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу такі як границя текучості, твердість, допустимий рівень деформації, стан поверхні перед обробкою та її мікрогеометрія, а також форма і габарити як самої деталі, так і робочого інструмента. При цьому максимально допустиме зусилля обкатки деталей із якісних вуглецевих сталей становить:

$$P = p \cdot F, \tag{1}$$

де F – площа контакта кульки із циліндричною поверхнею деталі.

На площу F впливають діаметр кульки зміцнювального інструмента D, діаметр оброблювальної циліндричної поверхні D_d, залишкова пластична деформація Δh і місцева пружна деформація деталі ε [10]:

$$F = \frac{4}{3} D \sqrt{\frac{D_d}{(D_d \pm D)}} \cdot \left(\sqrt{(\Delta h + \varepsilon)\varepsilon} + \varepsilon + \frac{1}{4}\sqrt{\varepsilon \Delta h} \right). \tag{2}$$

Контактний питомий тиск p залежить від границі текучості σ_T, дотичних напружень τ, геометричних параметрів деталі та інструмента, їх частоти обертання [14]:

$$p = 2{,}85\sigma_T - \frac{\tau \cdot \varphi}{D_d}\left(D - D_d \frac{n}{n_d} \right). \tag{3}$$

Під час обкатування сталевих поверхонь підвищення навантаження покращує характеристики наклепу. Так, із зростанням тиску із 250 до 1250 Н/кулька шорсткість поверхні залишається на рівні Ra 0,2 мкм, при цьому глибина наклепу для сталі 45 збільшується із 0,9 до 1,8 мм, а ступінь наклепу в середньому підвищується на 11 %. Найбільш доцільним для сталевих поверхонь є тиск у межах 1000–1250 Н/кульку. Найвищі результати ступеня наклепу спостерігали при обкатуванні циліндричних поверхонь при навантаженні, що не перевищувало границю міцності сталі 45 більше ніж на 10–12 %. При подальшому збільшенні навантаження індентора на поверхню циліндричної деталі спостерігали перенаклеп та локальні зони руйнування.

Під час обкатування подачу встановлювали, орієнтуючись на необхідний початковий рівень шорсткості. При цьому врахували, що на якість поверхні після зміцнення впливають тип матеріалу оброблюваної деталі, діаметр індентора та кількість проходів, що особливо важливо при виконанні завершальних операцій.

Подачу зміцнювального інструмента визначали [15] з урахуванням частоти обертання шпинделя верстата n, кількості кульок у головці z, діаметра кульки D, діаметра кола, по якому рухаються кульки d, значення шорсткості поверхні Ra та подачі на одну кульку $s_к$:

$$s = n \cdot i \cdot z \cdot k \cdot \sqrt{D \cdot Ra}, \tag{4}$$

де i – передаточне відношення, $i = D/d$, k – коефіцієнт проковзування кульок під час обкатки, $k = 0{,}94\ldots0{,}96$.

Дослідження показало, що показники шорсткості, подачі та діаметри кульок інденторів взаємопов'язані між собою. Протягом одного оберту кульки навколо осі зміцнювальної головки заготовка деталі переміщується на

відстань подачі $s_к$. Величина подачі суттєво впливає на стан обробленої поверхні. Із зростанням подачі збільшується інтервал між вершинами мікронерівностей, а кількість повторних натискань на одну й ту ж ділянку зменшується, що призводить до підвищення шорсткості та зменшення глибини і рівня наклепу. Залежність ступеня наклепу *C*, шорсткості *Ra* та глибина наклепу *h* від подачі *s* зміцнювального інструмента наведено на рисунку 1.

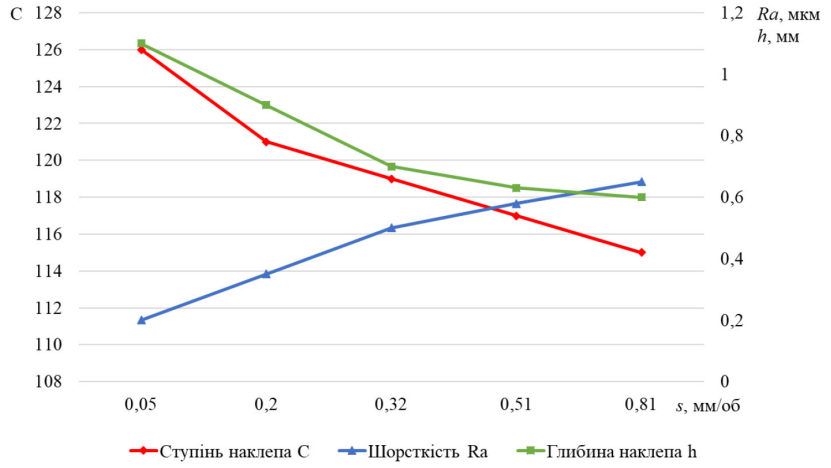


Рис. 1. Залежність ступеня наклепу *C*, шорсткості *Ra* та глибини наклепу *h* від подачі *s* зміцнювального інструмента для сталі 45

Із графіків (рис. 1) видно, що при зростанні подачі у 15 разів шорсткість поверхні збільшується на два класи. У свою чергу, глибина наклепаного шару зменшилась у 2,5 раза, а ступінь наклепу *C* знизився на 11 %. Таким чином, аналіз результатів показав доцільність оптимальних значень подачі для сталі 45, що становить 0,05 мм/кульку.

Вплив діаметра індентора *D* на ступінь наклепу *C*, шорсткість *Ra* та глибину наклепу *h* для сталі 45 показано на рисунку 2.

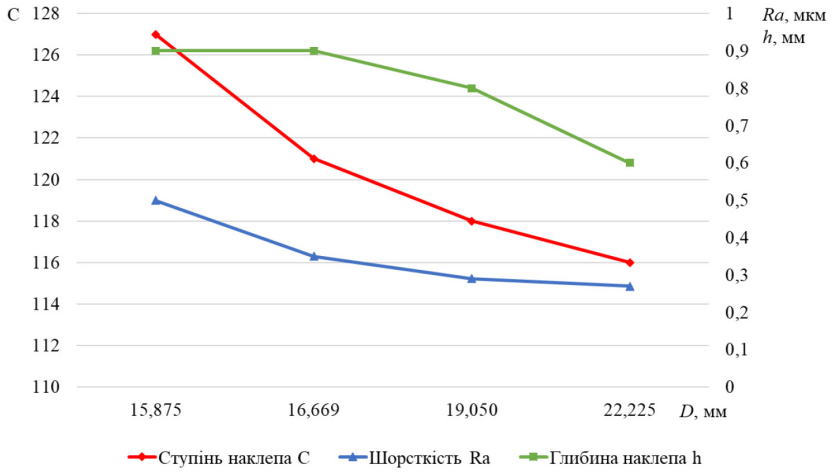


Рис. 2. Залежність ступеня наклепу *C*, шорсткості *Ra* та глибина наклепу *h* від діаметра індентора *D* для сталі 45

При збільшенні діаметрів кульок із 15,875 до 22,225 мм за інших незмінних умов, спостерігається незначне зниження шорсткості поверхні, а також зменшення глибини та ступеня наклепу на 48 % і 11 % відповідно. Таке явище можна пояснити наступним чином: при незмінних подачі та питомому тиску, збільшення діаметра кульки призводить до зростання кількості контактів із поверхнею на одиницю площі, що позитивно впливає на зниження шорсткості. Зменшення глибини та ступеня наклепу пов'язано з тим, що при менших діаметрах під час кочення кульки формується пружно-пластичний клин, який впливає на більшу глибину і з більшою інтенсивністю, ніж у випадку із більшими діаметрами.

Кількість проходів має суттєвий вплив на твердість поверхневого шару та шорсткість, і, зазвичай, визначається експериментальним шляхом. Найчастіше він варіюється від одного до трьох, залежно від обраних значень інших параметрів режиму обкатування. Надмірне збільшення кількості проходів призводить до зростання

ступеня деформації, однак водночас може негативно позначитись на якості обробленої поверхні. У той же час твердість поверхневого шару та глибина впливу деформації зростають. У даному дослідженні для запобігання погіршення стану оброблювальної поверхні, виконали два додаткові проходи з меншою подачею та зниженим тиском на ролик. Такий підхід сприяв покращенню шорсткості обкатаної поверхні.

Якісні сталі менш схильні до перенаклепу, тому збільшення кількості проходів не має суттєвого впливу на показники чистоти поверхні. Для сталі 45 при одному проході забезпечується шорсткість Ra 0,35 мкм, а при п'яти проходах – Ra 0,3 мкм, тобто показник збільшується на один клас. У випадку високоміцних сталей збільшення кількості проходів є доцільним, оскільки це помітно покращує міцнісні характеристики обробленої поверхні.

Швидкість обкатування залежить від частоти обертання зміцнювального сепаратора відносно деталі та її геометричних розмірів і визначається [15]:

$$\upsilon = \frac{\pi \cdot D_d \cdot n}{1000}. \quad (5)$$

Вибір швидкості обкатування безпосередньо впливає на шорсткість поверхні та глибину зміцнення. Із підвищенням швидкості обкатування рівень шорсткості поверхні збільшується. Це пов'язано з тим, що при нижчих швидкостях мікронерівності згладжуються ефективніше. Пластична деформація у таких умовах переважає над пружною, оскільки кулька довше впливає на кожну ділянку поверхні. У міру зростання швидкості контактний час скорочується, і пружна складова деформації стає домінуючою. Зростання пластичної деформації відстає від темпів збільшення швидкості навантаження.

Тож для підвищення продуктивності допустимо проводити обкатку на вищих швидкостях, якщо метою є досягнення високої якості обробки поверхні. Однак, якщо завдання полягає в отриманні більшої глибини та ступеня наклепу, необхідно використовувати нижчі швидкості.

Висновки

Проведене дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

1. Показники шорсткості, подачі та діаметри кульок інденторів взаємопов'язані між собою.
2. Збільшення подачі зміцнювального інструмента у 15 разів підвищує шорсткість поверхні на два класи. При цьому глибина наклепаного шару зменшується у 2,5 раза, а ступінь наклепу *С* знижується на 11 %. Оптимальне значення подачі для сталі 45 становить 0,05 мм/кульку.
3. Під час обкатування сталевих поверхонь підвищення навантаження покращує характеристики наклепу: глибина наклепу для сталі 45 збільшується із 0,9 до 1,8 мм, а ступінь наклепу в середньому підвищується на 11 %.
4. Під час збільшення діаметрів кульок зміцнювального інструмента, за інших незмінних умов, спостерігається незначне зниження шорсткості поверхні, а також зменшення глибини та ступеня наклепу.

Список використаної літератури

1. Аулін В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами: монографія. *Кропивницький: Лисенко В. Ф.* 2017, 278 с.
2. Сідашенко О. І., Скобло Т. С., Войтов В. А. Практикум з ремонту машин. *Харків: ХНТУСГ*. 2007, 415 с.
3. Афтаназів І. С., Гавриш А. П., Китичок П. О. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням : Навчальний посібник. *Житомир: ЖІТІ*, 2001.
4. Сердюк О. В., Сивак І. О., Карватко М. А. Напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика. *Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*. 2013, Вип. 40. с. 251–256.
5. Дудніков А. А., Дудник В. В., Бурлака О. А., Канівець О. В. Зміна характеристик матеріалу деталей при вібраційному зміцненні. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020, № 4 (99). С. 21-28. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-4-3.
6. Сошко В. О., Діневич Г. Ю., Сімінченко І. П., Малигін О. В., Крючковський В. В. Використання багатофакторних статистичних моделей для дослідження процесів, що спостерігаються при механічній обробці металів: навч.-метод. посіб. *Херсон*: *Олді-плюс*, 2010. 94 с.
7. Савуляк В. В. Пластичне деформування тонколистового матеріалу в умовах звичних локалізацій деформацій та напружень : монографія. Вінниця: *УНІВЕРСУМ-Вінниця*. 2008, 150 с.
8. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. Частина 2. Визначення накопиченої деформації та інтенсивності логарифмічних деформацій на основі різних апроксимацій. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010, № 3. С. 99–102.
9. Субботіна В. В., Білозеров В. В., Субботін О. В. та інші Управління величиною і розподілом залишкових макронапружень, що подаються обкочуванням роликами. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2024, № 107(2024). С. 78–81. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.78
10. Zhao J., Zhou W., Tang J., Jiang T., Liu H. Analytical and experimental study on the surface generation mechanism in shot peening. Archives of Civil and Mechanical Engineering.2022, 22 (3). DOI: 10.1007/s43452-022-00431-7

11. Лавріненко Н. М., Сукманов В. О., Авраменко А. О., Українець А. І., Афенченко Д. С., Шульга А. В. Кінцево-елементне моделювання в інженерних розрахунках : Підручник. Донецьк : *ДонНУЕТ, Норд-Прес*. 2008, 668 с.

12. Khomenko A. V. Severe plastic deformation: Methods and mathematical models of nanomaterials formation. 2020, 24(2), art. no. 2001, pp. 1–20. DOI: 10.30970/jps.24.2001

13. Дудніков А. А., Дудник В. В., Біловод О. І., Канівець О. В., Бурлака О. А. Підвищення ресурсу зерно-посівних машин. *Інженерія природокористування*. 2021, № 4(18), С. 68–72. DOI: https://doi.org/10.37700/enm.2020.4(18).68–72

14. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. *Тернопіль : Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя*. 2011, 322 с.

15. Krishnan K. M. Principles of materials characterization and metrology. *Oxford: Oxford University Press*, 2021. 868 p.

References

1. Aulin, V. V. (2017). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti i nadiinosti robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn z rizalnymy elementamy: monohrafiia [Tribophysical bases for increasing the wear resistance and reliability of tillage machines with cutting elements: a monograph]. *Kropyvnytskyi: Lysenko V. F.* [in Ukrainian].

2. Sidashenko, O. I., Skoblo, T. S., & Voitov, V. A. (2007). Praktykum z remontu mashyn [Machine repair workshop]. *Kharkiv : KhNTUSH*. [in Ukrainian].

3. Aftanaziv, I. S., Havrysh, A. P., & Kytychok, P. O. (2001). Pidvyshchennia nadiinosti detalei mashyn poverkhnevym plastychnym deformuvanniam : Navchalnyi posibnyk [Improving the reliability of machine parts by surface plastic deformation : A tutorial]. *Zhytomyr : ZhITI*. [in Ukrainian].

4. Serdiuk, O. V., Syvak, I. O., & Karvatko, M. A. (2013). Napruzheno-deformovanyi stan v oseredku deformatsii pry vdavliuvanni toroidalnoho rolyka [Stress-strain state in a deformation cell during toroidal roller indentation]. *Naukovi notatky: mizhvuzivskyi zbirnyk (za haluziamy znan "Tekhnichni nauky")*. Vyp. 40. pp. 251–256. [in Ukrainian].

5. Dudnikov, A. A., Dudnyk, V. V., Burlaka, O. A., & Kanivets, O. V. (2020). Zmina kharakterystyk materialu detalei pry vibratsiinomu zmitsnenni [Changes in the material characteristics of parts during vibration hardening]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 4(99). pp. 21–28. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-4-3. [in Ukrainian].

6. Soshko, V. O., Dinevych, H. Yu., Siminchenko, I. P., Malyhin, O. V., & Kriuchkovskyi, V. V. (2010). Vykorystannia bahatofaktornykh statystychnykh modelei dlia doslidzhennia protsesiv, shcho sposterihaiutsia pry mekhanichnii obrobtsi metaliv [The use of multivariate statistical models to study the processes observed in metal machining]. *Kherson : Oldi-plius*. [in Ukrainian].

7. Savuliak, V. V. (2008). Plastychne deformuvannia tonkolystovoho materialu v umovakh zvychnykh lokalizatsii deformatsii ta napruzhen : monohrafiia [Plastic deformation of thin sheet material under conditions of usual localization of deformations and stresses: monograph]. *Vinnytsia* : *UNIVERSUM-Vinnytsia*. [in Ukrainian].

8. Mykhalevych, V. M., & Dobraniuk, Yu. V. (2010). Model plastychnoho deformuvannia materialu na vilnii poverkhni tsylindrychnykh zrazkiv pid chas visesymetrychnoho osadzhennia. Chastyna 2. Vyznachennia nakopychenoi deformatsii ta intensyvnosti loharyfmichnykh deformatsii na osnovi riznykh aproksymatsii [Model of plastic deformation of material on the free surface of cylindrical samples during axisymmetric deposition. Part 2. Determination of the accumulated strain and intensity of logarithmic deformations based on various approximations]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. № 3. pp. 99–102. [in Ukrainian].

9. Cubbotina, V. V., Bilozerov, V. V., Cubbotin, O. V. & et all (2024). Upravlinnia velychynoiu i rozpodilom zalyshkovykh makronapruzhen, shcho podaiutsia obkochuvanniam rolykamy [Controlling the magnitude and distribution of residual macro-stresses applied by rolling]. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. № 107 (2024). pp. 78–81. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.78 [in Ukrainian].

10. Zhao, J., Zhou, W., Tang, J., Jiang, T., & Liu, H. (2022). Analytical and experimental study on the surface generation mechanism in shot peening. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 22 (3). DOI: 10.1007/s43452-022-00431-7

11. Lavrinenko, N. M., Sukmanov, V. O., Avramenko, A. O., Ukrainets, A. I., Afenchenko, D. S., & Shulha, A. V. (2008). Kintsevo-elementne modeliuvannia v inzhenernykh rozrakhunkakh : Pidruchnyk [Finite element modeling in engineering calculations : A textbook]. *Donetsk : DonNUET, Nord-Pres*. [in Ukrainian].

12. Khomenko, A. V. (2020). Severe plastic deformation: Methods and mathematical models of nanomaterials formation. 24 (2), art. no. 2001, pp. 1–20. DOI: 10.30970/jps.24.2001

13. Dudnikov, A. A., Dudnyk, V. V., Bilovod, O. I., Kanivets, O. V., & Burlaka, O. A. (2021). Pidvyshchennia resursu zernoposivnykh mashyn [Increasing the service life of grain sowing machines]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*. № 4(18), pp. 68–72. DOI: https://doi.org/10.37700/enm.2020.4(18).68–72. [in Ukrainian].

14. Zakalov, O. V., & Zakalov, I. O. (2011). Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh: Navchalnyi posibnyk [Fundamentals of friction and wear in machines: A tutorial]. *Ternopil: Vyd-vo TNTU im. I. Puliuia*. [in Ukrainian].

15. Krishnan, K. M. (2021). Principles of materials characterization and metrology. *Oxford : Oxford University Pres*.

УДК 614.842 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.11

О. В. КАНІВЕЦЬ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4364-8424

І. М. КАНІВЕЦЬ
кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри будівництва та професійної освіти
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-1670-5553

О. У. ДРОЖЧАНА
старший викладач кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-8214-2624

Н. М. ОПАРА
кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
професор кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-0128-8400

В. В. ДУДНИК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6553-2951

БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ В АГРАРНОМУ СЕКТОРІ: РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МАШИННОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОЖЕЖ НА ПОЛЯХ

У статті актуалізовано проблему вчасного відслідковування пожеж на сільськогосподарських полях, поширення яких завдають значних економічних втрат та впливають на безпеку життєдіяльності як працівників, так і оточуючих людей. Запропоновано удосконалити алгоритм відслідковування пожеж за допомогою розробленої математичної моделі для системи машинного зору, яку можна встановити на літальні апарати по типу БПЛА. Проведений аналіз використання засобів машинного зору у сільському господарстві для виявлення пожеж показав, що на даний час розроблено потужні нейромережі для розпізнавання лісових пожеж, які потребують стаціонарних обчислювальних потужностей. Метою дослідження є розробка легкої за обчислювальними витратами та ефективної математичної моделі системи машинного зору для виявлення пожеж на сільськогосподарських полях як інструмента безпеки життєдіяльності працівників. Запропоновано алгоритм програми машинного зору та показано результат її роботи на зображеннях із польовими пожежами. Під час експериментальних досліджень система розпізнала локації диму та вогню і обвела ці об'єкти синім та червоним кольором відповідно та проінформувала оператора БПЛА. Завдяки здатності системи оперативно виявляти пожежі в режимі реального часу можливе швидке реагування пожежних служб, що зменшує масштаб поширення вогню. Вчасне виявлення пожеж не лише мінімізує втрати сільськогосподарських угідь та знижує економічні збитки, але й істотно зменшує ризики для здоров'я та життя людей, які можуть опинитися поблизу осередків займання. Крім того, своєчасне виявлення пожеж сприяє зменшенню викидів токсичних продуктів горіння в атмосферу, що позитивно впливає на екологічну безпеку. Таким чином, інтеграція машинного зору в системи моніторингу пожеж є важливим кроком до підвищення рівня безпеки життєдіяльності в аграрному секторі.

Ключові слова: *безпека життєдіяльності, пожежа, вогонь, дим, поле, машинний зір, математична модель.*

O. V. KANIVETS
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0003-4364-8424

I. M. KANIVETS
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Civil Engineering
and Professional Education
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-1670-5553

O. U. DROZHCHANA
Senior Lecturer at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0001-8214-2624

N. M. OPARA
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-0128-8400

V. V. DUDNYK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6553-2951

LIFE SAFETY IN THE AGRICULTURAL SECTOR: IMPLEMENTATION OF A MATHEMATICAL MODEL OF MACHINE VISION FOR DETECTING FIRES IN THE FIELDS

The article highlights the issue of timely detection of fires in agricultural fields, the spread of which causes significant economic losses and poses a threat to the safety of both workers and the surrounding population. An improved fire detection algorithm is proposed, based on a developed mathematical model for a computer vision system that can be installed on unmanned aerial vehicles (UAVs). An analysis of the use of computer vision tools in agriculture for fire detection has shown that, at present, powerful neural networks have been developed for recognizing forest fires, but they typically require stationary computing resources. The aim of the study is to develop a computationally lightweight and efficient mathematical model for a computer vision system capable of detecting fires in agricultural fields, serving as a tool to enhance the safety of workers. A computer vision algorithm is proposed, and its performance is demonstrated using images of field fires. During experimental tests, the system successfully identified smoke and fire locations, highlighting them in blue and red, respectively, and notifying the UAV operator. Due to the system's ability to promptly detect fires in real time, emergency services can respond quickly, thereby reducing the spread of the fire. Timely fire detection not only minimizes the loss of agricultural land and reduces economic damage, but also significantly lowers the risks to human health and life for those who may be near the ignition source. Moreover, early detection contributes to the reduction of toxic combustion emissions into the atmosphere, positively impacting environmental safety. Thus, the integration of computer vision into fire monitoring systems is a crucial step toward enhancing life safety in the agricultural sector.

Key words: *life safety, fire, fire, smoke, field, machine vision, mathematical model.*

Постановка проблеми

Пожежі на сільськогосподарських полях становлять серйозну загрозу не лише для врожаю та безпеки життєдіяльності людей, а й для економіки аграрного сектора в цілому. Зазвичай, вогонь швидко поширюється сухими полями, знищує посіви, руйнує родючий шар ґрунту, порушує екологічну рівновагу та знищує біорізноманіття, водночас створює прямі ризики для життя працівників сільського господарства, місцевих мешканців і рятувальників. Під час польових робіт, особливо в посушливий сезон, навіть невелика іскра може спричинити масштабну пожежу, тому дотримання правил пожежної безпеки набуває першочергового значення. Нехтування елементарними правилами безпеки, зокрема курінням на полі чи використанням несправної техніки, часто призводить до непоправних наслідків. Пожежі вивільняють у повітря токсичні речовини, що загрожують здоров'ю людей та

тварин, а також можуть спричиняти масові отруєння [1]. Особливо небезпечними є пожежі поблизу житлових будинків, електроліній та автошляхів, де ризик поширення полум'я надзвичайно високий.

Забезпечення належного пожежного захисту сільськогосподарських угідь, проведення регулярних інструктажів, наявність спеціальної техніки та засобів пожежогасіння є обов'язковими елементами трудової діяльності. Системна профілактика, чітка організація праці та свідоме ставлення до правил безпеки можуть зберегти життя і здоров'я людей та майбутній урожай.

Незважаючи на комплекс протипожежних заходів, що реалізуються в аграрних господарствах, загорання виникають в силу природніх та техногенних чинників. Наявність вогню та диму визначають за допомогою датчиків на основі аналізу хімічного складу повітря. Вони якісно працюють у закритих приміщеннях, зокрема в офісах, на виробничих об'єктах, у житлових приміщеннях. Однак ефективність подібних систем значно знижується в умовах відкритих просторів, таких як сільськогосподарські поля, великі промислові цехи, прибудинкові ділянки, вуличні зони, парки й лісові масиви [2, 3]. Низьку якість вчасного виявлення загорання можна пояснити тим, що під впливом погодних умов, зокрема вітру, дощу чи снігу, продукти горіння та температура полум'я змінюються, що унеможливлює їх коректне визначення подібними датчиками. Тому вчасне виявлення диму та полум'я на полях, наприклад, за допомогою камер відеоспостереження, дає змогу запобігти втратам від загоряння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Традиційні методи виявлення пожеж у відеопотоці значною мірою орієнтуються на аналіз візуальних ознак вогню зокрема кольору, фактури, геометричних контурів, а також просторово-часових характеристик. Так, у роботі [4] розробники зосередили увагу на відстеженні змін між кадрами в межах ряду базових візуальних параметрів, що вказують на можливу присутність пожежі таких як колір, площа ділянки та нерівність поверхні. Розпізнавання самої пожежі здійснюється за допомогою байєсівського класифікатора. У дослідженні [5] на початковому етапі обробки зображення застосовано *HSV*-перетворення кольорів та метод Харріса для виявлення кутів. Для визначення наявності чи відсутності вогню дослідники використали класифікатор, що дозволило мінімізувати кількість хибний результатів. У роботі [6] запропоновано метод розпізнавання вогню на основі кольорових ознак, що впроваджувався для моніторингу на платформах безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Проте через складність та мінливість лісових умов часто траплялися випадки як пропуску, так і помилкового виявлення пожеж.

Останнім часом згорткові нейронні мережі (CNN) набули широкого поширення в сфері комп'ютерного зору [7]. На відміну від традиційних підходів, що вимагають ручного виділення ознак, CNN здатні самостійно навчатися характеристикам за допомогою операцій згортки, що забезпечує вищу точність розпізнавання та кращу здатність до узагальнення. Такі моделі активно застосовуються у виявленні пожеж. Наприклад, у роботі [8] представлено метод виявлення лісових пожеж із використанням нейромереж Faster-RCNN, R-FCN, SSD та Yolov3. Результати порівняння показали високу точність алгоритму на базі Yolov3, яка становила 83,7 %, що суттєво перевершувало інші підходи та відповідало вимогам для реального застосування.

У дослідженні [9] описано використання нейромережі Faster R-CNN у поєднанні з грассмановим многовидом для підвищення точності ідентифікації. Запропонований підхід передбачав проєктування можливих осередків займання, виявлених через Faster R-CNN, у грассмановий простір, після чого точки цього простору об'єднувались відповідно до критерію локальної близькості на многовиді.

У роботі [10] розробники інтегрували дві окремі навчені моделі Yolov5 і EfficientDet для генерації обмежувальних прямокутників виявлення вогню. Додатковий класифікатор перевіряв точність роботи нейромереж, що дало змогу зменшити кількість хибних виявлень.

Дослідження [11] присвячене розробці двопотокової згорткової нейромережі, що призначена для виявлення вогняних осередків. На вхід даної моделі нейромережі подається два типи зображень, а саме: звичайне зображення сцени та зображення різниці між двома кадрами. Такий принцип розпізнавання дозволив поєднати просторові статичні та часові динамічні характеристики.

Зазначені вище алгоритми нейномереж демонструють високу точність роботи на потужних обчислювальних системах. Проте, коли мова йде про граничні обчислювальні пристрої, зокрема ті, що встановлюються на БПЛА, виникають суттєві обмеження щодо доступних ресурсів та енергоспоживання. Це значно ускладнює реалізацію масштабних обчислювальних моделей на таких платформах.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є розробка легкої за обчислювальними витратами та ефективної математичної моделі системи машинного зору для виявлення пожеж на сільськогосподарських полях як інструмента безпеки життєдіяльності працівників.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розвиток технологій машинного зору зробило можливим автоматичне виявлення об'єктів, таких як пожежі, на цифрових зображеннях із відеопотоку. Для цього необхідно отримати інформацію про стан місцевості за допомогою відеопристроїв і оцінити ймовірність виникнення загоряння. У процесі виявлення загорання основним завданням оператора є своєчасне реагування на сигнали системи [12].

На відеозображеннях дим і полум'я являють собою динамічні текстури, що мають як просторові, так і часові характеристики. До часових параметрів належать рух і зміни границь об'єкта в часі. Зокрема, дим, зазвичай, поширюється повільніше, ніж полум'я. Просторові особливості диму та вогню на відео включають колір, прозорість, фрактальність (турбулентність) і мерехтіння.

Полум'я вогню зазвичай проявляється у відтінках червоного, помаранчевого і жовтого, тоді як дим змінюється від світло-сірого до темно-сірого майже чорного кольору. Незважаючи на значну варіативність кольору як між класами, так і всередині одного класу, колір залишається однією з ключових ознак для виявлення полум'я та диму.

Зазвичай, зображення із відеопотоку фіксуються у форматі *RGB*. Одним із недоліків використання колірного простору *RGB* для виявлення вогню та диму є те, що пікселі вогню та диму мають високу насиченість як у червоному, так і в зеленому каналах [13]. Це пов'язано з тим, що у форматі *RGB* яскравість і колірна складова не розділені. Для вирішення такого обмеження доцільніше перетворювати зображення із формату *RGB* у більш гнучкі колірні простори такі як: *YCbCr*, *HSV* або *CIELab*, де канали *Y*, *S* та *L* надають інформацію про яскравість вогню, а компоненти *Cb*, *Cr*, *H*, *S*, *a* та *b* видають більш виразні колірні характеристики диму та полум'я.

Колірний простір *HSV* наближено відтворює колір у режимі сприйняття людським оком: відтінок (Hue) відповідає за колір пікселя, насиченість (Saturation) вказує на ступінь змішування білого до чистого кольору, а значення (Value) визначає інтенсивність яскравості пікселя. У просторі *YCbCr* компонент *Y* відповідає за яскравість, *Cb* відображає різницю між синім і яскравістю, а *Cr* – між червоним і яскравістю. Аналогічно, у *CIELab* параметр *L* означає освітленість, а компоненти *a* та *b* передають колірні осі: *a* варіюється від зеленого до пурпурового, а *b* – від синього до жовтого. Математичні моделі для конвертації кольорового простору *RGB* у інші формати наведено у (1–10) [14].

Перехід від *RGB* до *HSV*:

$$H=\begin{cases}0,\ якщо\ \max(R,G,B)=\min(R,G,B)\\ \left(60°\times\dfrac{g-b}{\max(R,G,B)-\min(R,G,B)}+0°\right)\bmod 360°,\ якщо\ \max(R,G,B)=r\\ \left(60°\times\dfrac{b-r}{\max(R,G,B)-\min(R,G,B)}+120°\right)\bmod 360°,\ якщо\ \max(R,G,B)=g\\ \left(60°\times\dfrac{r-g}{\max(R,G,B)-\min(R,G,B)}+240°\right)\bmod 360°,\ якщо\ \max(R,G,B)=b\end{cases}; \tag{1}$$

$$S=\begin{cases}0,\ якщо\ \max(R,G,B)=0\\ \dfrac{\max(R,G,B)-\min(R,G,B)}{\max(R,G,B)}=1-\dfrac{\min(R,G,B)}{\max(R,G,B)}\end{cases}; \tag{2}$$

$$V=\max(R,\ G,\ B). \tag{3}$$

Перехід від *RGB* до *YCbCr*:

$$Y=0{,}299R+0{,}587G+0{,}114B, \tag{4}$$

$$Cb=B-Y, \tag{5}$$

$$Cr=R-Y, \tag{6}$$

$$\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0{,}412453 & 0{,}357580 & 0{,}180423\\ 0{,}212671 & 0{,}715160 & 0{,}072169\\ 0{,}019334 & 0{,}119193 & 0{,}950227\end{bmatrix}\begin{bmatrix}R\\G\\B\end{bmatrix}. \tag{7}$$

Перехід від *RGB* до *CIELab*:

$$L=\begin{cases}116\times\left(\dfrac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}}-16,\ \text{якщо}\ \left(\dfrac{Y}{Y_n}\right)>0{,}008856\\ 116\times\left(\dfrac{Y}{Y_n}\right),\qquad \text{якщо}\ \left(\dfrac{Y}{Y_n}\right)\le 0{,}008856\end{cases}; \tag{8}$$

$$a=500\cdot\left\{\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}}-\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right\}, \tag{9}$$

$$b = 200 \cdot \left\{ \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}, \quad (10)$$

де *Xn*, *Yn*, *Zn* – триколірні значення опорних білих точок.

Для використання запропонованих математичних моделей з метою виявлення ділянок із полум'ям та димом і їх відокремлення від інших яскравих природних об'єктів із кожного блоку зображення обчислюються середні значення для компонентів колірних просторів *Cb*, *Cr*, *H*, *S*, *V*, *a* та *b*. Додатково, для виявлення незначних за розміром пікселів полум'я в межах блоку, також визначаються максимальні значення параметрів *Y*, *Cr*, *H*, *S*, *a* та *b* для кожного блоку.

Основні етапи аналізу характеристик диму і полум'я на основі наявної послідовності зображень наступні: 1. Отримання даних; 2. Загальний аналіз зображення; 3. Виявлення об'єктів на зображенні; 4. Обчислення характеристик; 5. Виведення результатів.

Перший етап виконується системою моніторингу та полягає у фіксації послідовності зображень контрольованого поля. Широкий вибір інструментів дають змогу застосовувати алгоритми цифрової обробки зображень і машинного зору для аналізу та модифікації візуальних даних. Одним із найпоширеніших інструментів є бібліотека комп'ютерного зору з відкритим вихідним кодом OpenCV [15].

На другому етапі виконується загальний аналіз характеристик зображення, зокрема яскравості, контрастності та інших параметрів, що залежать від умов зйомки та особливостей обладнання. Для зручності, зображення переводиться у колірний формат, наприклад, *HSV*, після чого визначається параметр, що відповідає об'єкту типу «вогонь» на цьому знімку. На заключних етапах послідовно обробляються всі кадри із застосуванням загальноприйнятих методів цифрової обробки зображень.

Коли загоряння відбувається на відкритих полях, то основним спостережуваним елементом стає дим (рисунок 1), а територію можна узагальнено описати як «дим». На рисунку 1, *а* наведено приклад роботи розробленої на основі математичної моделі системи машинного зору для виявлення диму. Система визначила області, що класифікуються як дим, і обвела їх синім контуром. На рисунку 1, *б* показано чорно-білу маску зображення, де білим підсвічено область, що розпізнана як дим. Такий прийом дещо спрощує процес виявлення пожежі порівняно з випадками, коли на зображенні присутні житлові будівлі, гірська місцевість або водні об'єкти.



а б

Рис. 1. Приклад роботи розробленого алгоритму із виявлення диму: а – розпізнана область диму; б – маска зображення диму

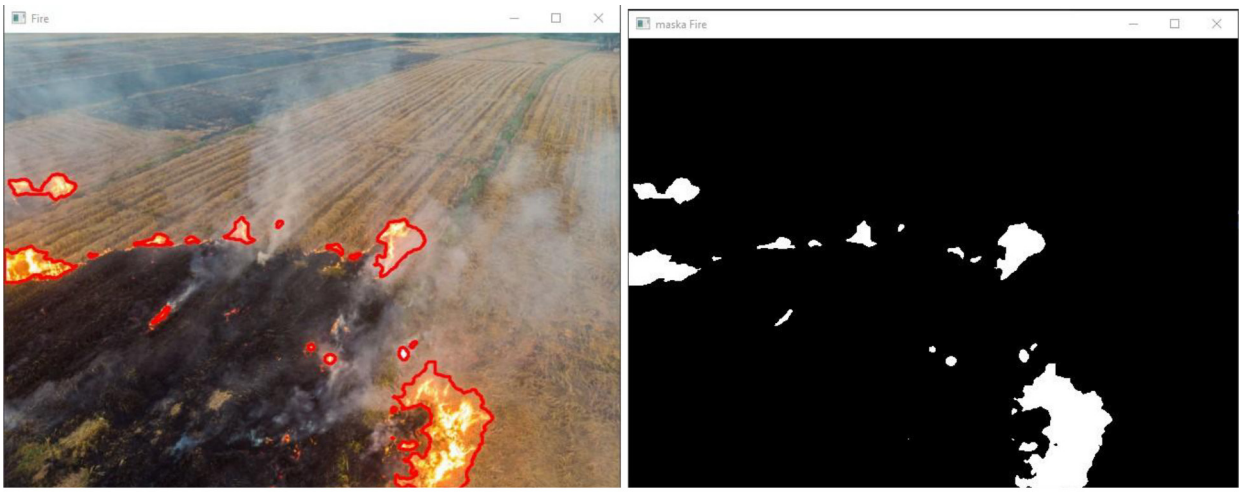
Але за несприятливих погодних умов, наприклад при хмарності (рисунок 2), пошук таких категорій як «дим» і «вогонь», може спричинити помилкові результати.

Для уникнення подібних помилок у визначенні пожежі, вводиться третій етап – виявлення заздалегідь визначеного об'єкта типу «вогонь». Перед запуском програми визначається цільовий об'єкт, після чого коригуються його параметри відповідно до загальних характеристик зображення. У межах даного дослідження було використано наступні параметри: розподіл кольорів для об'єкта «дим» та контрастність у граничній зоні «вогонь».

Для опису розподілу кольорів застосовували алгоритми виявлення границь об'єктів на зображеннях. Спочатку виділяли область, у межах якої обчислюється розподіл кольорів, потім отримані дані порівнювали із параметрами, що характерні для об'єкта «дим». На основі аналізу програма визначає належність піддослідної області до об'єкта типу «вогонь» та/або «дим». На рисунку 3 наведено приклад роботи розробленого алгоритму із виявлення полум'я. Розпізнані області вогню виділяються червоним контуром.



Рис. 2. Приклад зображення із складними погодними умовами для роботи системи



а б

Рис. 3. Приклад роботи розробленого алгоритму із виявлення вогню: а – розпізнані області вогню; б – маска зображення вогню

Перевірка на наявність загоряння проводиться паралельно для двох об'єктів: дим та вогонь. Такий підхід дозволяє виявити пожежу на ранніх стадіях, що сприяє запобіганню можливих економічних збитків та людських жертв. Додатково система дозволяє інформувати користувача про виявлені підозрілі небезпеки.

Висновки

Виявлено проблему вчасного відслідковування пожеж на сільськогосподарських полях, поширення яких завдають значних економічних втрат та впливають на безпеку життєдіяльності як працівників, так і оточуючих людей. Запропоновано удосконалити систему відслідковування пожеж за допомогою розробки математичної моделі для системи машинного зору, яку можна встановити на літальні апарати по типу БПЛА. Проведений аналіз використання засобів машинного зору у сільському господарстві та виробничих сферах показав, що на даний час розроблено потужні нейромережі для розпізнавання лісових пожеж та загорання нафтових платформ, що потребують стаціонарних обчислювальних потужностей, але відсутні легкі мобільні математичні моделі. Запропоновано алгоритм програми машинного зору та показано результат її роботи на зображеннях із польовими пожежами. Розроблена система дозволяє розпізнавати окремі об'єкти по типу «дим» та «вогонь». Під час експериментальних досліджень система розпізнала локації диму та вогню і обвела ці об'єкти синім та червоним кольором відповідно та проінформувала оператора БПЛА. Завдяки здатності системи оперативно виявляти займання в режимі

реального часу можливе швидке реагування пожежних служб, що зменшує масштаб поширення вогню. Це не лише мінімізує втрати сільськогосподарських угідь та знижує економічні збитки, але й істотно зменшує ризики для здоров'я та життя людей, які можуть опинитися поблизу осередків займання. Крім того, своєчасне виявлення пожеж сприяє зменшенню викидів токсичних продуктів горіння в атмосферу, що позитивно впливає на екологічну безпеку. Таким чином, інтеграція машинного зору в системи моніторингу пожеж є важливим кроком до підвищення рівня безпеки життєдіяльності в аграрному секторі.

Список використаної літератури

1. Гуліда Е. М., Ренкас А. А. Вплив пожеж на екологічну безпеку навколишнього середовища. *Науковий вісник НГУ : Екологічна безпека, охорона праці*. 2014, № 5, С. 91–100.

2. Toreyin B. U., Dedeoglu Y., Gueduekbay U. Computer vision based method for real-time fire and flame detection. *Pattern Recognition Letters*. 2006, 27(1), pp. 49–58.

3. Kinaneva D., Hristov G., Raychev J., Zahariev P. Early forest fire detection using drones and artificial intelligence. *42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*. MIPRO. 2019, Proceedings, art. no. 8756696, pp. 1060–1065. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8756696

4. Borges P., Izquierdo E. A Probabilistic Approach for Vision-Based Fire Detection in Videos. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol*. 2010, 20, pp. 721–731.

5. Ryu J., Kwak D. Flame Detection Using Appearance-Based Pre-Processing and Convolutional Neural Network. *Appl. Sci*. 2021, 11, pp. 5138.

6. Yuan C., Ghamry K. A., Liu Z., Zhang Y. Unmanned aerial vehicle based forest fire monitoring and detection using image processing technique. *In Proceedings of the 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*, Nanjing, China, 12–14 August 2016; pp. 1870–1875.

7. Jindal P., Gupta H., Pachauri N., Sharma V., Verma O.P. Real-Time Wildfire Detection via Image-Based Deep Learning Algorithm. *In Soft Computing: Theories and Applications. Springer*: Singapore. 2021, pp. 539–550.

8. Li P., Zhao W. Image fire detection algorithms based on convolutional neural networks. *Case Stud. Therm. Eng*. 2020, 19, pp. 100625.

9. Barmpoutis P., Dimitropoulos K., Kaza K., Grammalidis N. Fire Detection from Images Using Faster R-CNN and Multidimensional Texture Analysis. *In Proceedings of the ICASSP 2019–2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brighton*, UK, 12–17 May 2019, pp. 8301–8305.

10. Xu R., Lin H., Lu K., Cao L., Liu Y. A Forest Fire Detection System Based on Ensemble Learning. *Forests*. 2021, 12, pp. 217.

11. Lu P., Zhao Y., Xu Y. A Two-Stream CNN Model with Adaptive Adjustment of Receptive Field Dedicated to Flame Region Detection. *Symmetry*. 2021, 13, pp. 397.

12. Kanivets O. V., Kanivets I. M., Gorda T. M., Burlaka O. A. Development of a machine vision program to determine the completeness of wrapping plants in the soil, *CEUR Workshop Proceedings*. 2022, Vol. 3077, pp. 27–43. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3077/paper04.pdf

13. F. M. AnimHossain, Youmin M. Zhang, Masuda AkterTonima Forest fire flame and smoke detection from UAV-captured images using fire-specific color features and multi-color space local binary pattern. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 2020, 8(4), pp. 285-309. DOI: 10.1139/juvs-2020-0009

14. Chen X., Hopkins B., Wang H., O'Neill L., Afghah F., Razi A., Fulé P., Coen J., Rowell E., Watts A. Wildland Fire Detection and Monitoring Using a Drone-Collected RGB/IR Image Dataset, *IEEE Access*. 2022, 10, pp. 121301–121317. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3222805

15. Nelson K. N., Boehmler J. M., Khlystov A. Y., Moosmüller H., Samburova V., Bhattarai C., Wilcox E. M., Watts A. C. A multipollutant smoke emissions sensing and sampling instrument package for unmanned aircraft systems: Development and testing. *Fire*. 2019, 2(2), art. no. 32, pp. 1–18. DOI: 10.3390/fire2020032

References

1. Hulida, E. M., & Renkas, A. A. (2014). Vplyv pozhezh na ekolohichnu bezpeku navkolyshnoho seredovyshcha [Fire Damage Of Environment]. Naukovyi visnyk NHU : Ekolohichna bezpeka, okhorona pratsi. № 5, pp. 91–100. [in Ukrainian].

2. Toreyin, B. U., Dedeoglu, Y., & Gueduekbay, U. (2006). Computer vision based method for real-time fire and flame detection. Pattern Recognition Letters. 27(1), pp. 49–58.

3. Kinaneva, D., Hristov, G., Raychev, J., & Zahariev, P. (2019). Early forest fire detection using drones and artificial intelligence. 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics. MIPRO. Proceedings, art. no. 8756696, pp. 1060–1065. DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8756696.

4. Borges, P., & Izquierdo, E. A (2010). Probabilistic Approach for Vision-Based Fire Detection in Videos. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. 20, pp. 721–731.

5. Ryu, J., & Kwak, D. (2021). Flame Detection Using Appearance-Based Pre-Processing and Convolutional Neural Network. Appl. Sci. 11, pp. 5138.

6. Yuan, C., Ghamry, K.A., Liu, Z., & Zhang, Y. (2016). Unmanned aerial vehicle based forest fire monitoring and detection using image processing technique. In Proceedings of the 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), Nanjing, China, 12–14 August 2016; pp. 1870–1875.

7. Jindal, P., Gupta, H., Pachauri, N., Sharma, V., & Verma, O. P. (2021). Real-Time Wildfire Detection via Image-Based Deep Learning Algorithm. In Soft Computing: Theories and Applications; Springer: Singapore. pp. 539–550.

8. Li, P., & Zhao, W. (2020). Image fire detection algorithms based on convolutional neural networks. Case Stud. Therm. Eng. 19, pp. 100625.

9. Barmpoutis, P., Dimitropoulos, K., Kaza, K., & Grammalidis, N. (2019). Fire Detection from Images Using Faster R-CNN and Multidimensional Texture Analysis. In Proceedings of the ICASSP 2019–2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brighton, UK, 12–17 May 2019, pp. 8301–8305.

10. Xu, R., Lin, H., Lu, K., Cao, L., & Liu, Y. (2021). A Forest Fire Detection System Based on Ensemble Learning. Forests. 12, pp. 217.

11. Lu, P., Zhao, Y., & Xu, Y. (2021). A Two-Stream CNN Model with Adaptive Adjustment of Receptive Field Dedicated to Flame Region Detection. Symmetry. 13, pp. 397.

12. Kanivets, O. V., Kanivets, I. M., Gorda, T. M., & Burlaka, O. A. (2022). Development of a machine vision program to determine the completeness of wrapping plants in the soil, CEUR Workshop Proceedings. Vol. 3077, pp. 27–43. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3077/paper04.pdf

13. F. M., AnimHossain, Youmin, M. Zhang, & Masuda, AkterTonima. (2020). Forest fire flame and smoke detection from UAV-captured images using fire-specific color features and multi-color space local binary pattern. Journal of Unmanned Vehicle Systems. 8(4), pp. 285–309. DOI: 10.1139/juvs-2020-0009

14. Chen, X., Hopkins, B., Wang, H., O'Neill, L., Afghah, F., Razi, A., Fulé, P., Coen, J., Rowell, E., & Watts, A. (2022). Wildland Fire Detection and Monitoring Using a Drone-Collected RGB/IR Image Dataset, IEEE Access. 10, pp. 121301–121317. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3222805

15. Nelson, K. N., Boehmler J. M., Khlystov A. Y., Moosmüller H., Samburova V., Bhattarai C., Wilcox E. M., & Watts A. C. (2019). A multipollutant smoke emissions sensing and sampling instrument package for unmanned aircraft systems: Development and testing. Fire. 2(2), art. no. 32, pp. 1–18. DOI: 10.3390/fire2020032

УДК 656.6:338.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.12

О. В. КИРИЛЛОВА
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт»
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0002-3414-7364

В. Л. РОМАХ
аспірант, старший викладач кафедри «Експлуатація портів
і технологія вантажних робіт»
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0003-3958-0041

ТРАНСФОРМАЦІЯ РИНКУ ГЛОБАЛЬНИХ ОПЕРАТОРІВ КОНТЕЙНЕРНИХ ТЕРМІНАЛІВ У КОНТЕКСТІ ІНТЕРНАЦІОНАЛІЗАЦІЇ, РЕГІОНАЛІЗАЦІЇ ТА ЦИФРОВОЇ АДАПТАЦІЇ

У період 2019–24 рр. глобальна контейнерна індустрія зазнала суттєвого впливу екстремальних подій – пандемії, геополітичних конфліктів, природних катаклізмів, які істотно змінили динаміку контейнерних перевезень і спричинили структурну трансформацію світового ринку термінальних операторів. Ці виклики актуалізували потребу в перегляді стратегій інтернаціоналізації, моделей адаптації до регуляторного середовища, а також підходів до цифрової трансформації діяльності глобальних термінальних операторів (Global Terminal Operators, GTO). ***Метою*** *статті є аналіз впливу глобальних екстремальних подій (COVID-19, геополітичні конфлікти, порушення ланцюгів постачання) на динаміку контейнерних перевезень у 2019–24 рр., а також оцінка ролі процесів інтернаціоналізації, консолідації, регіоналізації та цифрової адаптації у трансформації структури глобального ринку портових термінальних операторів (Global Terminal Operators – GTO) з урахуванням сучасних стратегій злиття, поглинання, концесій та формування стратегічних альянсів.* ***Результати.*** *Проведено структурний аналіз впливу екстремальних подій на світові контейнерні перевезення та портову інфраструктуру. Визначено ключові стратегії адаптації GTO: локалізацію, розвиток публічно-приватного партнерства, цифровізацію та реагування на інституційні бар'єри. Запропоновано два альтернативні методичні підходи до оцінювання технологічної зрілості GTO: базовий (на основі середнього арифметичного) та удосконалений, що передбачає використання вагових коефіцієнтів для чотирьох цифрових критеріїв: TOS, автоматизація, CPI, DTA. Побудовано рейтинг GTO згідно за кожним із підходів; встановлено, що PSA International та APM Terminals демонструють найвищий рівень технологічної зрілості, тоді як COSCO Shipping Ports та China Merchants Ports мають технологічний паритет, але характеризуються нижчою інноваційною гнучкістю.* ***Висновки.*** *Застосування вагового методичного підходу до оцінювання технологічної зрілості дозволяє точніше визначати стратегічну ефективність GTO, забезпечуючи дієвий аналітичний інструмент для бенчмаркінгу та цифрового позиціювання. Запропонована методика може бути використана для формування політики цифрової трансформації портових терміналів, оцінювання інвестиційної привабливості, а також розробки стратегій адаптації до геоекономічних викликів.*

Ключові слова. *водний транспорт, транспортна інфраструктура, порт, ринок портових послуг, портові оператори, контейнерні перевезення, контейнерні термінали, конкурентоспроможність, інтернаціоналізація, регіоналізація, автоматизація, адаптаційні стратегії.*

O. V. KYRYLLOVA
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Department of Ports Operation and Cargo Handling Technology
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-3414-7364

V. L. ROMAKH
Postgraduate Student, Senior Lecturer at the Department
of Ports Operation and Cargo Handling Technology
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0003-3958-0041

TRANSFORMATION OF THE GLOBAL CONTAINER TERMINAL OPERATORS MARKET IN THE CONTEXT OF INTERNATIONALIZATION, REGIONALIZATION AND DIGITAL ADAPTATION

Between 2019 and 2024, the global container industry experienced significant disruption due to extreme events – the COVID-19 pandemic, geopolitical conflicts, and natural disasters – which fundamentally altered the dynamics of container shipping and triggered a structural transformation of the global terminal operator market. These challenges underscored the need to revise internationalization strategies, models of regulatory adaptation, and approaches to the digital transformation of Global Terminal Operators (GTOs). ***Purpose.*** *The purpose of this article is to analyze the impact of global extreme events (COVID-19, geopolitical conflicts, supply chain disruptions) on the dynamics of container shipping during 2019–24, and to assess the role of internationalization, consolidation, regionalization, and digital adaptation in transforming the structure of the global market of port terminal operators (Global Terminal Operators – GTOs), taking into account current strategies of mergers, acquisitions, concessions, and the formation of strategic alliances.* ***Results.*** *A structural analysis was conducted to examine the effects of extreme events on global container flows and port infrastructure. Key GTO adaptation strategies were identified, including localization, the development of public-private partnerships, digitalization, and responses to institutional barriers. Two alternative methodological approaches to evaluating GTO technological maturity are proposed: a basic approach (based on arithmetic mean scoring), and an advanced methodology involving the application of weighted coefficients for four digital maturity criteria – TOS (Terminal Operating Systems), equipment automation, customer and partner integration (CPI), and digital technologies & analytics (DTA). Rankings of GTOs were developed according to each approach. It was found that PSA International and APM Terminals demonstrate the highest levels of technological maturity, whereas COSCO Shipping Ports and China Merchants Ports show technological parity but exhibit lower levels of innovation agility.* ***Conclusions.*** *Applying a weighted methodological approach to assess technological maturity enables a more accurate evaluation of the strategic effectiveness of GTOs, offering a practical analytical tool for benchmarking and digital positioning. The proposed methodology can serve as a foundation for developing port terminal digital transformation policies, assessing investment attractiveness, and formulating strategies for adaptation to geo-economic challenges.*

Key words: *maritime transport, transport infrastructure, seaport, port services market, terminal operators, container shipping, container terminals, competitiveness, internationalization, regionalization, automation, adaptation strategies.*

Вступ

Глобальні трансформації у світовій торгівлі, стійке зростання обсягів контейнерних перевезень, а також помірно-оптимістичні прогнози щодо подальшого впровадження контейнерних технологій у систему міжнародних транспортних мереж стимулюють портових операторів до активнішого формування конкурентних стратегій на ринку контейнерних терміналів. У цих умовах глобальні термінальні оператори (GTO) змушені адаптуватися до зростаючої складності зовнішнього середовища, що формується під впливом екстремальних подій, геоекономічної нестабільності, інституційної фрагментації та технологічних проривів. Це, своєю чергою, актуалізує потребу в перегляді моделей інтернаціоналізації, стратегій регіоналізації та цифрової адаптації як ключових інструментів забезпечення сталого розвитку та конкурентоспроможності GTO у трансформованій структурі глобального ринку портових послуг.

Постановка проблеми

Стивідорна діяльність у морських портах традиційно розглядається як відкритий і конкурентний сегмент транспортної галузі, що формує динамічне середовище для взаємодії контейнерних терміналів і стратегічного позиціонування портових операторів, з особливим акцентом на інтеграцію з глобальними судноплавними лініями.

У цьому контексті дедалі активніше розгортаються процеси консолідації, корпоратизації та інтернаціоналізації, які охоплюють як глобальних контейнерних перевізників, так і операторів портових терміналів. Ці процеси супроводжуються поглибленням взаємозв'язків між транспортними сегментами, формуванням стратегічних альянсів і зростанням масштабів операційної взаємозалежності.

Водночас сучасна фаза глобальної контейнеризації характеризується інтенсивною трансформацією ринкових структур, прискореною цифровізацією, зміною геоекономічного ландшафту та еволюцією моделей організації термінального бізнесу. Це питання перебуває у фокусі міжнародних наукових досліджень, які концентруються на широкому спектрі проблем, зокрема: нестабільності світового ринку, геополітичній турбулентності, загостренні регіональної конкуренції, високій волатильності ланцюгів постачання, а також зростаючих вимогах до цифрової та інституційної адаптації.

Зазначені фактори створюють потребу в оновленні наукових підходів до аналізу портової індустрії, зокрема у формуванні нових моделей інтеграції, залученості та стратегічної взаємодії GTO в умовах структурної перебудови світового ринку контейнерних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для глибшого розуміння та всебічного дослідження зазначених проблем було опрацьовано широкий спектр наукових джерел і публікацій зарубіжних авторів, які висвітлюють як загальні тенденції розвитку глобальної

контейнеризації, так і специфіку функціонування портових контейнерних терміналів у контексті сучасних структурних трансформацій.

Глобальні зміни у структурі світової торгівлі, стійка позитивна динаміка контейнерних перевезень, а також стабільні прогнози щодо подальшого розширення сфер застосування контейнерних технологій у міжнародному транспортному середовищі стимулюють операторів контейнерних терміналів до активнішого формування конкурентного ринку портових послуг на інституційному, технологічному та організаційному рівнях.

Спираючись на сучасні підходи до інтернаціоналізації компаній, у роботі [1] запропоновано концептуальну модель інтернаціоналізації глобальних компаній, що передбачає прискорене проникнення на ринки завдяки здатності формувати та масштабувати наукоємну продукцію і технології. Теоретичні засади впливу просторових і часових чинників на процес іноземної експансії в межах реалізації зовнішньої стратегії зростання (зокрема через придбання кількох термінальних активів у межах єдиної угоди) розкрито у дослідженні [2].

Інституційні зміни в портовому секторі, пов'язані з інтернаціоналізацією, зокрема з інвестиційною активністю транснаціональних корпорацій (ТНК) і визнанням часової компоненти як ключового чинника інтернаціоналізаційного розвитку, проаналізовано в [3]. Автори акцентують увагу на ролі відкритості зовнішнього середовища як одного з визначальних інституційних параметрів при виході ТНК на нові ринки.

У дослідженні [4] методом регресійного аналізу з використанням методу найменших квадратів проаналізовано чинники, що впливають на темпи розширення географічного охоплення багатонаціональних підприємств, що розвиваються (EMNE). У публікації акцентовано увагу на вирішальній ролі кумулятивних переваг стратегій внутрішньої інтернаціоналізації та міжрегіональної диверсифікації у стимулюванні зовнішньої експансії EMNE, що відрізняє їх від традиційних багатонаціональних підприємств (TMNE).

У роботі [5] авторами розглянуто можливості реалізації процесів корпоратизації через трансформацію формату та масштабу інфраструктури, де оператори терміналів виступають ключовими суб'єктами управління активами.

Питання диференціації стратегій виходу на ринок глобальних операторів терміналів, зокрема у форматі державно-приватного партнерства (ДПП), досліджено в [6]. У роботі використано метод біноміальної логістичної регресії на основі великої вибірки угод із контейнерними терміналами за певний період. Проаналізовано вплив різноманітних факторів (специфічних, зовнішніх, проєктних, міжкультурних) на вибір типу ДПП (прямого / непрямого).

У публікаціях [7–9] досліджено основні системи управління портами та їх похідні моделі. Визначено значущість ДПП у стратегічному розвитку портових терміналів та охарактеризовано ознаки ефективних моделей портового управління. Водночас у [10] виокремлено пріоритетні інструменти реалізації стратегій портового розвитку.

У дослідженні [11] передача портових послуг приватним операторам розглядається як ключовий механізм збереження контролю портових адміністрацій над організацією та структурою ринку термінальних послуг. На основі цієї роботи було розроблено практичний посібник для європейських портів щодо передачі терміналів приватним операторам. Посібник набув форми так званого «м'якого права» в межах формування портової політики ЄС.

У праці [12] досліджено процес інтернаціоналізації з урахуванням внутрішніх, зовнішніх та міжкультурних чинників, включаючи попередні критерії вибору компаній для виходу на ринок та кількісні характеристики.

У роботі [13], базуючись на переосмисленні моделей просторової та функціональної еволюції портів і портових систем, авторами запропоновано концепцію регіоналізації, в якій обґрунтовано потребу у впровадженні нових підходів до управління портами та їх функціонального призначення, що виходять за межі традиційного периметра порту. На основі цієї концепції, у праці [14] зосереджено увагу на новій динаміці внутрішніх портових районів із урахуванням контейнеризації, управління ланцюгами поставок і розміщення внутрішніх терміналів. Акцент зроблено на парадигмі зміни ролі проміжних вузлів у межах форленд-регіоналізації.

Комплексний аналіз сучасної портової галузі систематизовано та узагальнено у виданні [15], яке охоплює, зокрема, питання портового управління, конкуренції, політики портів тощо.

У публікації [16], на основі широкого спектра існуючих джерел, закладено підґрунтя для подальших досліджень «…розвитку конкретного порту з урахуванням поточного стану і наявних реалій». Зокрема, обґрунтовано підходи до формування конкурентного ринку портових контейнерних терміналів у контексті глобальної інтернаціоналізації та регіоналізації.

Аналіз широкого спектра наукових джерел дозволяє виявити сучасні тенденції трансформації діяльності глобальних операторів терміналів у контексті зміни просторових стратегій та посилення ролі регіоналізації.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є аналіз впливу глобальних екстремальних подій (COVID-19, геополітичні конфлікти, порушення ланцюгів постачання) на динаміку контейнерних перевезень у 2019–24 рр., а також оцінка ролі процесів інтернаціоналізації, консолідації, регіоналізації та цифрової адаптації у трансформації структури глобального ринку портових термінальних операторів (Global Terminal Operators – GTO) з урахуванням сучасних стратегій злиття, поглинання, концесій та формування стратегічних альянсів.

Для досягнення поставлених мети сформульовано наступні задачі:

1. Дослідити наслідки глобальних екстремальних подій (пандемії, війн, геополітичних загроз, кліматичних катастроф) на динаміку контейнерних перевезень та функціонування портової галузі у період 2019–24 рр.
2. Проаналізувати ключові тенденції інтернаціоналізації, консолідації та регіоналізації на ринку глобальних термінальних операторів, зокрема структуру угод про злиття та поглинання (Mergers and Acquisitions, M&A), динаміку інвестицій у портову інфраструктуру, географічну концентрацію активів та особливості регіональних стратегій.
3. Систематизувати сучасні моделі трансформації ринку глобальних термінальних операторів і виявити адаптаційні стратегії GTO у відповідь на зміну глобального середовища, включаючи зростаючу роль локалізації, розвиток публічно-приватного партнерства, цифровізацію та подолання інституційних бар'єрів.
4. Розробити матрицю технологічної зрілості GTO як інструмент кількісного оцінювання рівня цифрової адаптації та стратегічної готовності до нової технологічної парадигми; провести позиціонування провідних GTO на основі визначених критеріїв.
5. Удосконалити модель обчислення індексу технологічної зрілості GTO з урахуванням вагових коефіцієнтів і специфіки окремих напрямів цифрової трансформації.

Викладення основного матеріалу дослідження

За останні майже тридцять років глобальна світова торгівля з використанням контейнерних технологій демонструє стабільно позитивну динаміку. Водночас, незважаючи на цей загальний тренд, галузь контейнерних перевезень зазнає впливу низки екстремальних факторів, таких як геополітичні конфлікти, пандемії, природні катаклізми тощо, а також пов'язаних із ними наслідків [17].

1. Вплив глобальних екстремальних подій на контейнерні перевезення та портову інфраструктуру в період 2019–24 рр.

Основними чинниками спадів у динаміці контейнерних перевезень у період 2019–23 рр. стали напруженість і зміна вектору відносин між США та Китаєм, пандемія COVID-19, початок війни в Україні, загострення геополітичної ситуації на Близькому Сході, природні катаклізми, а також вплив «людського фактору». Попри позитивну динаміку «доковідного» періоду, у 2020 році через обмеження, пов'язані з пандемією, глобальний ринок контейнерних перевезень зазнав втрат. Втім, морський транспорт зміг протистояти викликам, і вже у третьому кварталі 2020 року обсяги торгівлі, зокрема контейнерної, повернулися до рівня показників до початку пандемії. У 2021 році процес відновлення тривав, проте в 2022 році обсяги морської торгівлі знизилися на 0,4 % порівняно з 2021 роком. У 2023 році світова морська торгівля зросла на 2,4 %. Незважаючи на нестійкість відновлення, прогнози на найближчі п'ять років залишаються позитивними: очікується щорічне зростання від 2 % у наступному році до 2,4 % до 2029 року включно [17, 18].

2. Просторово-інституційна перебудова глобального ринку контейнерних терміналів у контексті M&A та регіоналізації.

Такий розвиток контейнерних перевезень на початку нового тисячоліття виявив дефіцит пропускної здатності портових терміналів, що стало поштовхом до трансформації конфігурації глобальних операторів портових терміналів. Це спричинило активізацію укладання ключових угод про злиття та поглинання. Протягом 1997–2010 років відбулося 35 таких операцій на різних майданчиках за участю близько 20 GTO-покупців із 12 країн і понад 30 цільових компаній із 14 країн. Загальна сума фінансових ресурсів, спрямованих на ці операції, перевищила 38 млрд. доларів США. Домінуючими учасниками таких угод стали стивідорні компанії (24 випадки) та фінансові оператори, зокрема судноплавні лінії (7 випадків). Варіації домовленостей у цих угодах охоплюють широкий спектр: від «…одночасного придбання різноманітних активів / об'єктів…» до «поглинання всієї корпорації… і приватних переговорів щодо пакетів акцій» [2], а основні об'єкти надбання (таблиця 1) сфокусовані у країнах Східної Азії, Європи та Північної Америки [2, 5, 6, 17, 18].

Така інтернаціоналізація спричинила появу низки завдань, пов'язаних із нерегулярністю та пакетністю характеру зовнішнього зростання, а також різноманітністю географічного розташування об'єктів. Їх розв'язання відбувається за допомогою застосування різних методів та стратегій, зокрема моделей прискореного просторового охоплення, агресивних стратегій виходу на ринки, стратегій органічного зростання (термінальні концесії) [3, 11, 12, 19].

Відповідно, виникла потреба в дослідженні факторів, що впливають на просторові та часові виміри процесів інтернаціоналізації, включаючи управлінські проблеми; а також у вивченні негативного впливу на здатність компаній до поглинання та факторів, які лежать в основі стратегій іноземного входу операторів терміналів у контейнерні порти [1, 4].

Наразі основна частина глобальної стивідорної діяльності сконцентрована на семи ключових ринках перевантаження. Загальна кількість активних контейнерних портів у світі станом на 2024 рік становить близько 940 одиниць [5, 14, 15, 17, 18]. Обсяг контейнерної перевалки у 2023 році оцінюється в 5917 млн. євро, що на 7,5 % менше порівняно з 2022 роком [17, 18]. Проте у 2023 році та на початку 2024 року спостерігається позитивні тенденції

Таблиця 1

Знакові об'єднання/поглинання що вплинули на формування сучасного формату ринку портових операторів

Оператор, що придбав	Тип оператора	Флагманська країна	Рік придбання	Оператор/термінал, що було придбано	Флагманська країна	Тип
Hutchison Ports	порт-й, глобальний	КНР	2001	ECT	Роттердам	місцева
				ICTSI.	Філіпінни	міжнародна
PSA (20 %)	порт-й, глобальний	Сінгапур	2001	Hesse Noordnatie	Бельгія	місцева
			2006	HPH	КНР	міжнародна
DP World	порт-й, глобальний	ОАЕ	2006	P&O Ports	Британія	місцева
			2006	CSX World	США	міжнародна
CMA CGM (51 %) та China Merchants (49 %)	ліній-й, глобальний	Франція КНР	2013	Terminal Link	міжнародна, 25 країн	
China Shipping та Cosco	Злиття ліній-й, глобальний	КНР	2016	Cosco Shipping Ports.	КНР	міжнародна
Cosco Shipping Ports	порт-й, глобальний	КНР	2017	Noatum.	Іспанія	місцева
China Merchants (49 %)	ліній-й, глобальний	КНР	2020	терміналів CMA Terminals,	міжнародна, 28 країн	

у роботі портів світу, а саме збільшується кількість заходів суден, покращується зв'язок і показники обробки вантажів. Зокрема, кількість заходів контейнеровозів у 2023 році значно зросло порівняно з 2021–22 рр., досягнувши позначки у понад 240 000 заходів.

За даними [17–20], понад 40 % глобальної пропускної здатності портів у світі припадає на сім провідних GTO: PSA International, China Merchants Ports, China Cosco Shipping, APM Terminals, DP World, Hutchison Ports та MSC Group. У 2023 році пропускна спроможність 21 провідного GTO зросла на 2,3 %, що значно перевищує зростання глобальної портової обробки, яке становить 0,3 % (рисунок 1).

Загальний обсяг перевалки контейнерів усіма глобальними операторами терміналів у 2023 році складає 428,8 млн TEU, що становить 49 % від загального світового показника. У той же час, процеси розширення потужностей та модернізації термінального обладнання у 2023 році вимагають капіталовкладень у розмірі 5,5 млрд дол. США, з яких 500 млн дол. США витрачається п'ятьма провідними глобальними операторами на модернізацію портового обладнання. Перший та п'ятий оператори зі списку ТОП-7 сумарно інвестують понад 1 млрд дол. США у капітальні витрати. Загальний показник інвестицій на 9 % перевищує рівень 2022 року і відзначає третій поспіль річний приріст, починаючи з 2020 року.

Така динамічність зберігається й у поточному році. Зокрема, у грудні 2024 року група MSC завершила придбання 49,9 % акцій компанії Hamburger Hafen und Logistik Aktiengesellschaft (HHLA), створивши спільне підприємство з містом Гамбург з метою зміцнення діяльності HHLA та підвищення її конкурентоспроможності на світовому ринку.

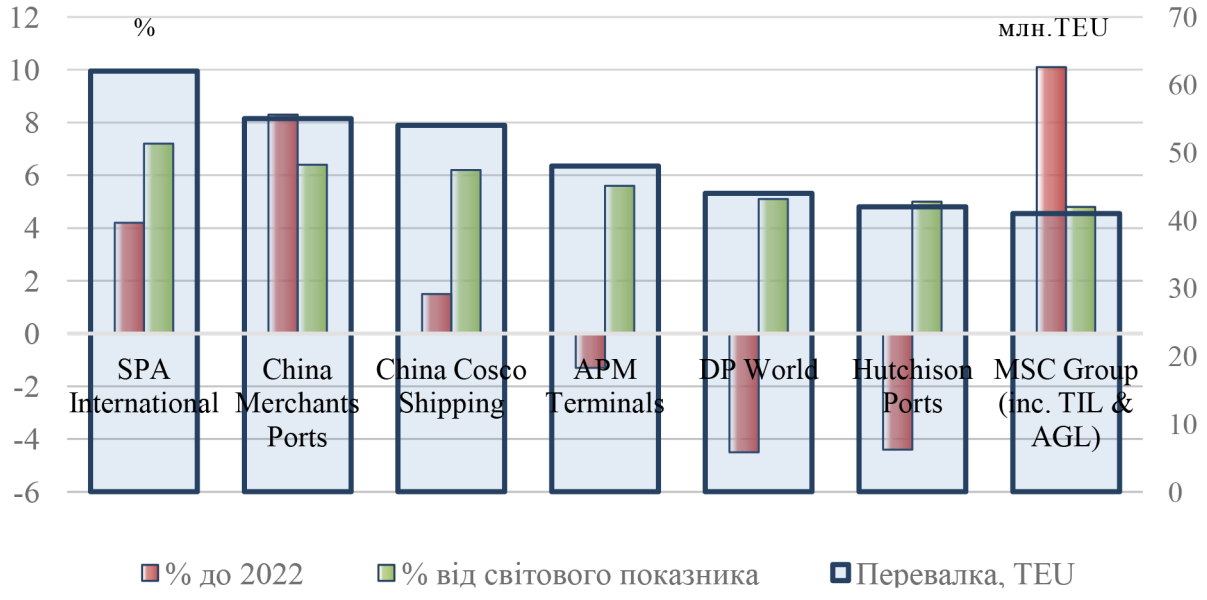


Рис. 1. Кількість портової обробки вантажу, ТОП-7 GTO (млн. TEU, % від загального світового показника, % відносно попереднього року)

Водночас компанія A. P. Moller – Maersk розглядає можливість участі у концесії контейнерного терміналу порту Чорноморськ, що пов'язано, зокрема, із переходом Maersk від стратегії розширення флоту до інтегрованої операційної моделі [21, 22].

3. Адаптаційні стратегії глобальних термінальних операторів в умовах геоекономічної нестабільності: локалізація, PPP, цифровізація та інституційні виклики.

Світова контейнерна індустрія перебуває на етапі глибокої трансформації, зумовленої зростанням геополітичної напруги, порушенням ланцюгів постачання, змінами в державному регулюванні та підвищеним інституційним тиском. У відповідь GTO адаптують свої моделі міжнародної присутності, управління та взаємодії з регіональними партнерами. На сьогодні чітко виокремлюються чотири ключові стратегії адаптації: локалізація, публічно-приватне партнерство, цифровізація та відповідь на інституційні бар'єри.

3.1. Локалізація як відповідь на регіональні виклики.

Зростаюча складність глобального середовища, посилення регуляторного контролю та політичної чутливості змушують глобальних портових операторів переглядати традиційні централізовані моделі управління. У цих умовах локалізація дедалі частіше розглядається як ефективна адаптаційна стратегія, що дозволяє зберігати гнучкість і відповідність локальним вимогам.

Компанія Hutchison Ports є показовим прикладом цього підходу. Діючи в понад 50 портах на території 25 країн, вона надає значну автономію регіональним офісам – зокрема у сфері кадрової політики, вибору локальних постачальників та ведення діалогу з місцевими регуляторами. Така гнучкість дозволяє Hutchison Ports ефективно адаптувати свою діяльність до правових, інституційних та культурних умов різних країн, включаючи В'єтнам, Мексику та держави Перської затоки.

У результаті, локалізація перетворюється на ключовий інструмент адаптації до політичних ризиків, збереження операційної ефективності в умовах регуляторної фрагментації та зміцнення зв'язків з локальними стейкхолдерами.

3.2. Публічно-приватне партнерство (PPP): нова архітектура входу на національні ринки.

Інструменти публічно-приватного партнерства (PPP) стали ключовим механізмом входу GTO на нові ринки, особливо в країнах, де портова інфраструктура залишається у державній власності та не підлягає приватизації. Механізми BOT (Build-Operate-Transfer), концесійні угоди та спільні підприємства дозволяють зменшити інституційні бар'єри входу, закріпити права на операційну діяльність, а також мінімізувати політичні та фінансові ризики.

Яскравим прикладом виступає DP World, який активно реалізує концесійні моделі у країнах Африки та Латинської Америки. Зокрема, у 2021 році компанія уклала 30-річну концесію на управління портом Ндайяне (порт Сену) у Сенегалі, що передбачає інвестиції обсягом 1,1 млрд. доларів США у розвиток контейнерної інфраструктури та поступову передачу управління державі після завершення терміну дії договору.

Показовою є також ситуація в Україні, яка, попри триваючу війну, активно розвиває механізми PPP у портовому секторі. У квітні 2025 року під час інвестиційної конференції у Варшаві уряд України презентував 40-річний концесійний проєкт для порту Чорноморськ, що охоплює контейнерний та універсальний термінали. Згідно з проєктом, очікується модернізація портової інфраструктури з доведенням пропускної здатності до 760 000 TEU та понад 5 млн тонн вантажів на рік. Технічна та фінансова підготовка до тендеру здійснюється за участю Міжнародної фінансової корпорації (IFC) та Європейського банку реконструкції та розвитку (ЄБРР), що забезпечує прозорість і привабливість умов для стратегічних інвесторів.

Серед потенційних учасників конкурсу – A. P. Moller-Maersk, один із найбільших світових гравців у сфері морських перевезень і термінальних послуг. Представники компанії вже провели офіційні візити до порту Чорноморськ з метою вивчення умов можливої участі у концесійному проєкті.

Цей кейс засвідчує, що навіть у високоризикових умовах, зокрема за умов війни, глобальні оператори зберігають стратегічний інтерес до інфраструктурних проєктів, що поєднують потенціал зростання з довгостроковою віддачею. Публічно-приватне партнерство, таким чином, виступає не лише інструментом входу на нові ринки, а й механізмом побудови стійких відносин з державними структурами, диверсифікації ризиків та отримання доступу до критичної інфраструктури.

Загалом, PPP-механізми все частіше розглядаються GTO як елемент адаптивної стратегії в умовах регіоналізації, загострення геополітичної конкуренції та потреби у формуванні нових транспортно-інфраструктурних альянсів.

3.3. Цифрова трансформація та автоматизація портових процесів.

Пандемія COVID-19 стала потужним каталізатором цифрової трансформації в портовій галузі, виявивши критичну залежність глобальних ланцюгів постачання від швидкості, надійності та прозорості портових операцій. У відповідь на нові виклики глобальні термінальні оператори (GTO) активізували впровадження передових цифрових рішень, орієнтованих на підвищення ефективності, гнучкості та стійкості до екстремальних подій.

Ключовими напрямами цифровізації стали [10, 23, 24]:

– застосування штучного інтелекту (AI) для прогнозування навантаження та оптимізації розміщення контейнерів;

– блокчейн-платформи для прозорості транзакцій і митного оформлення;

– інтелектуальні системи управління терміналами (TOS) з можливістю інтеграції в логістичні ланцюги;

– автоматизовані крани та безпілотні транспортні засоби, які забезпечують безперебійну обробку вантажів із мінімальним втручанням людини.

Показовим прикладом є діяльність компанії PSA International, яка впровадила цифрову платформу CALISTA (CArgo Logistics, Inventory Streamlining & Trade Aggregation) – інноваційне рішення, що поєднує функції логістичного планування, управління вантажопотоками та митного оформлення в єдиному інтегрованому середовищі. Завдяки CALISTA було досягнуто скорочення часу проходження вантажу через термінал на 20–30 %, що є суттєвим покращенням з погляду швидкості обслуговування та оборотності контейнерів.

Інший приклад – APM Terminals у Роттердамі, який став піонером в області повної автоматизації операцій. Компанія впровадила автономні портальні крани, роботизовані транспортні засоби (AGV) та автоматизовані системи складування. Це дозволило підвищити продуктивність на 15 %, одночасно знизивши витрати на технічне обслуговування обладнання, а також зменшити викиди вуглецю за рахунок переходу на електричну тягу.

Таким чином, цифрова трансформація дедалі більше розглядається не як опція, а як стратегічна необхідність, що забезпечує конкурентоспроможність GTO в умовах постпандемічного глобального середовища, пришвидшує адаптацію до нових стандартів безпеки, екологічної відповідальності та інституційної прозорості.

3.4. Відповідь на інституційні бар'єри та геоекономічні обмеження.

У сучасному геополітичному контексті багато країн посилюють контроль над критичною інфраструктурою, включаючи порти, що створює нові виклики для GTO. Зокрема, держави дедалі частіше запроваджують обмеження на участь іноземного капіталу в управлінні портовими терміналами або накладають додаткові умови для участі у концесійних і тендерних процедурах. Це спонукає GTO розробляти альтернативні стратегії входу на національні ринки через створення спільних підприємств, залучення локальних партнерів або укладання кросакціонерних угод.

Яскравим прикладом є ситуація з портовим оператором China Merchants Ports (CMP), який у 2023 році зіткнувся з труднощами в Європейському Союзі під час спроби придбання частки в одному з портових терміналів через регуляторні застереження, пов'язані з безпекою та національними інтересами. У відповідь CMP реалізував обхідну стратегію: інвестиції здійснювалися через спільне підприємство з французькою компанією CMA CGM (структура *Terminal Link*), зареєстроване в Португалії. Такий підхід дозволив зберегти фактичний управлінський контроль, уникаючи прямої власності, яка могла б бути заблокована антимонопольними чи безпековими структурами ЄС.

На відміну від CMP, ситуація з компанією DP World у 2006 році завершилася політичною поразкою. Після придбання британської компанії P&O, яка мала операційні права на шість портів у США, DP World отримала початкове схвалення угоди з боку Комітету з іноземних інвестицій у США (CFIUS). Однак угода викликала потужну хвилю спротиву з боку Конгресу США, ЗМІ та громадськості через побоювання щодо національної безпеки. Під політичним тиском DP World була змушена відмовитися від американських активів і в подальшому передала їх американському інвестору – компанії AIG Global Investment Group (нині Ports America). Цей випадок став прецедентом, який продемонстрував, що GTO можуть не лише стикатися з обмеженнями, а й зазнавати примусу до виходу з ринку, попри попереднє погодження угод на урядовому рівні.

Такі приклади демонструють необхідність гнучкості в моделях входу на національні ринки. Глобальні оператори змушені адаптувати свої стратегії до нових інституційних та геоекономічних реалій, структуризуючи власність, змінюючи юрисдикцію компаній, створюючи гібридні управлінські моделі або вдаючись до стратегічних альянсів.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що GTO формують нову архітектуру функціонування в умовах зростаючої геополітичної напруженості – через поєднання локалізації, партнерства, технологічної модернізації та правової гнучкості. Ці інструменти дозволяють їм не лише зберігати конкурентоспроможність в умовах багатофакторної невизначеності, а й укорінюватися в нових стратегічних просторах із врахуванням політичних і безпекових ризиків.

4. Матриця технологічної зрілості глобальних термінальних операторів (GTO): методичне обґрунтування та прикладна оцінка.

У сучасних умовах трансформації світової портової індустрії цифрова зрілість GTO стає ключовим чинником їх конкурентоспроможності. Саме технологічна адаптивність визначає здатність GTO реагувати на зовнішні виклики, забезпечувати операційну ефективність, інтегруватися в цифрові ланцюги постачання та зберігати контроль у складному інституційному середовищі. В умовах прискореної цифрової трансформації морської інфраструктури визначення рівня технологічної зрілості GTO набуває стратегічного значення, адже дозволяє оцінити ефективність адаптації операторів до змін глобального середовища, оптимізації процесів та інтеграції в ланцюги постачання майбутнього.

Для формалізованої оцінки рівня цифрової зрілості запропоновано чотирикритеріальну модель, яка охоплює декілька напрямів (таблиця 2).

Таблиця 2

Критерії оцінки технологічної зрілості GTO

Критеріяї цифрової адаптації GTO	Характерні ознаки
1. Інформаційні системи управління терміналом *(Terminal Operating Systems, TOS)*	Рівень впровадження цифрових систем управління портовими та термінальними операціями: планування, диспетчеризація, моніторинг, аналітика та звітність
2. Автоматизація обладнання *(Equipment Automation, EA)*	Ступінь технічної модернізації обладнання: автоматизовані портальні крани, автономні тягачі (AGV), роботизовані системи складування, технології дистанційного управління
3. Інтеграція з клієнтами та партнерами *(Customer & Partner Integration, CPI)*	Рівень цифрової взаємодії з з користувачами: API-зв'язки, онлайн-платформи, самостійне електронне бронювання/моніторинг, цифровий документообіг, інтеграція з CRM та ERP системами
4. Цифрові технології, інтелектуальна аналітика та великі дані *(Digital Technologies, Intelligent Analytics & Big Data, AI/ML/IoT/Big Data)*	Застосування передових цифрових технологій: штучного інтелекту (AI – Artificial Intelligence), машинного навчання (ML – Machine Learning), Інтернету речей (IoT – Internet of Things), цифрових двійників, аналітики в реальному часі, великих даних (Big Data) для прогнозування, оптимізації та адаптивного управління в реальному часі

Матриця рівнів технологічної зрілості GTO (таблиця. 3) деталізує ознаки кожного рівня за всіма чотирма критеріями.

Таблиця 3

Матриця рівнів технологічної зрілості GTO

Рівень зрілості	Інформаційні системи управління терміналом	Автоматизація обладнання	Інтеграція з клієнтами	Цифрові технології та аналітика
1. Базовий	Фрагментарні локальні інформаційні системи для операційного обліку	Ручне управління, мінімальна автоматизація	Мінімальна взаємодія через email/Excel	Відсутність цифрових рішень або експерименти
2. Операційний	Впроваджено TOS з базовими функціями управління процесами	Часткова автоматизація кранів/воріт	API-доступ для замовлень і трекінгу, базовий онлайн-моніторинг	Використання Business Intelligence для звітності
3. Інтегрований	TOS інтегровано з ERP, CRM, митницею	Роботизоване навантаження / розвантаження, автономні тягачі (AGV)	Портали самообслуговування, інтеграція з клієнтськими платформами	Використання AI/ ML для прогнозування вантажопотоків
4. Цифровий	Єдина цифрова екосистема, повністю інтегрована в логістичні ланцюги	Повна автономізація кранів, тягачів, складів	Розумні контракти, інтероперабельність з ланцюгами постачання	Повна аналітика в реальному часі, цифрові двійники, адаптивне планування, Big Data-аналітика
5. Інноваційний (Лідерський)	Цифровий двійник терміналу, прогнозна аналітика на основі AI, повна інтеграція з національними логістичними платформами	Інтелектуальне, самонавчальне обладнання, оптимізація в реальному часі, дрони для обліку і контролю	Інтелектуальна клієнтська взаємодія: цифрові помічники, інтеграція з ERP клієнтів, налаштування послуг у реальному часі	Гіперавтоматизовані рішення на базі AI/ML/IoT/Big Data, інтеграція з цифровими платформами урядів і банків даних

Оцінка GTO за кожним критерієм здійснюється за п'ятибальною шкалою, де 1 бал означає базовий рівень, а 5 балів – лідерство в цифровій трансформації[1]. Підсумковий бал визначається як сума оцінок за кожним критерієм (макс. 20 балів), а індекс технологічної зрілості – як середнє арифметичне значення (макс. 5,00).

Оцінювання базується на: відкритих даних про цифрові ініціативи GTO (звіти, публікації, приклади впроваджень); аналізі інвестицій у автоматизацію, програмне забезпечення та аналітику; наявності та рівні розвитку цифрових платформ (наприклад, CALISTA у PSA або автономні крани в APM Terminals Роттердам); рівні інтеграції з користувачами (API, цифрові кабінети, онлайн-доступ до даних). Проведемо рейтингування провідних GTO на предмет їх технологічної зрілості у 2025 році (таблиця 4, рисунки 2, 3).

Для кожного з чотирьох критеріїв оператор отримує оцінку за шкалою від 1 до 5 балів. Підсумковий рівень технологічної зрілості GTO обчислюється шляхом тривіальних розрахунків:

[1] Примітка. 1 бал – базовий рівень (початкова автоматизація, фрагментарні системи); 2 бали – операційний рівень (локальна автоматизація, базова цифрова взаємодія); 3 бали – інтегрований рівень (взаємопов'язані інформаційні системи, роботизовані рішення); 4 бали – цифровий рівень (цифрова екосистема, інтероперабельність, аналітика в реальному часі); 5 балів – лідер цифрової трансформації (повна автономізація, широке застосування AI/ML/IoT/Big Data).

Таблиця 4

Рейтинг технологічної зрілості (ТЗ) провідних GTO у 2025 р.

Оператор	TOS	EA	CPI	DTA	Загальний бал ТЗ GTO (макс. 20)	Індекс ТЗ GTO
PSA International	5	4	5	5	19	4,75
APM Terminals	5	5	4	4	18	4,50
DP World	4	4	4	3	15	3,75
Hutchison Ports	3	3	4	3	13	3,25
China Merchants Ports	3	3	3	2	11	2,75
COSCO Shipping Ports	3	3	3	2	11	2,75
MSC Group (TIL Terminals)	2	2	3	2	9	2,25

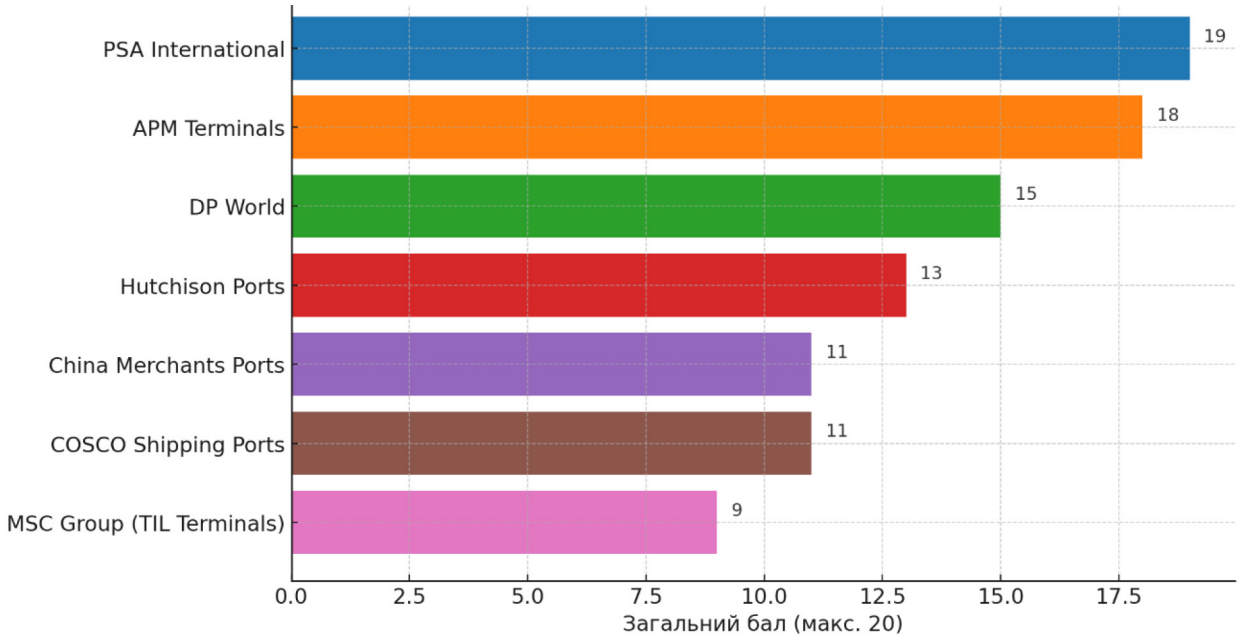


Рис. 2. Рейтинг технологічної зрілості глобальних термінальних операторів 2025 р. (за загальним балом)

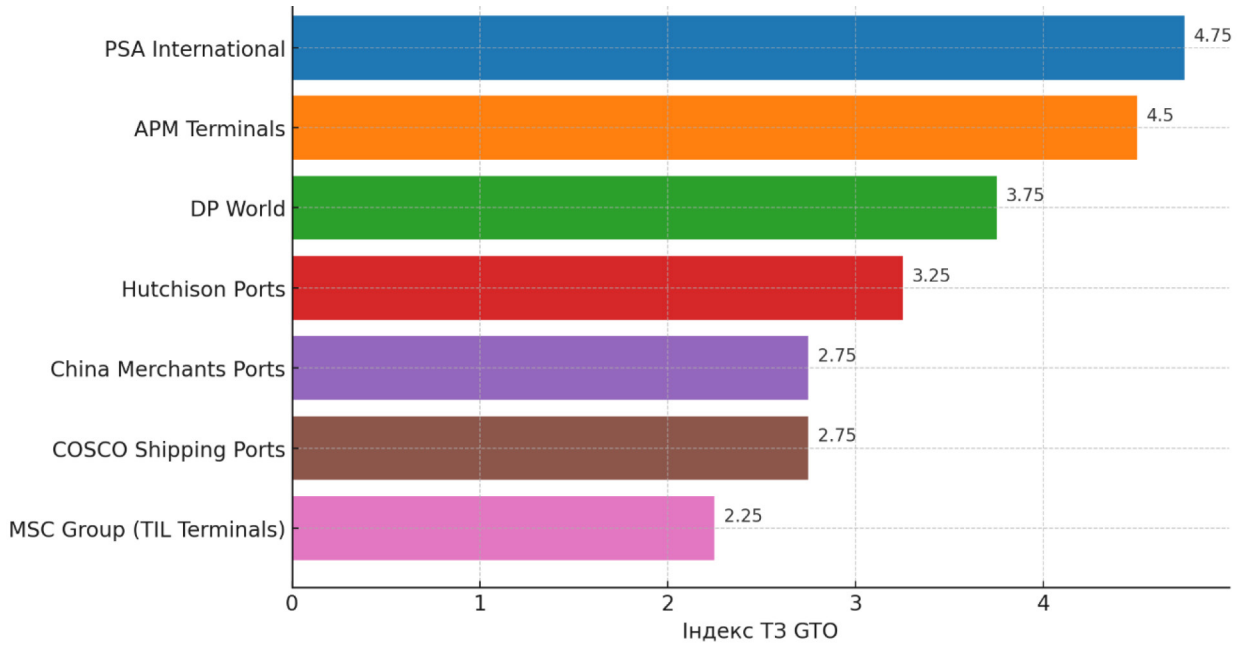


Рис. 3. Рейтинг технологічної зрілості глобальних термінальних операторів 2025 р. (за Індексом ТЗ GTO)

– загальний бал, тобто в абсолютному виражені, як сума чотирьох індикаторів за всіма критеріями:

$$ТЗ\ GTO = TOS + EA + CPI + DTA \quad (1)$$

де *TOS* – Інформаційні системи TOS; *EA* – Автоматизація обладнання; *CPI* – Інтеграція з клієнтами та партнерами; *DTA* – Цифрові технології та аналітика.

– індекс технологічної зрілості (ТЗ), як середнє арифметичне чотирьох індикаторів:

$$Індекс\ ТЗ\ \text{GTO} = \frac{TOS + EA + CPI + DTA}{4}. \quad (2)$$

Аналітичний висновок. За підсумками рейтингу (табл. 4), PSA International та APM Terminals демонструють найвищий рівень цифрової зрілості, що зумовлено глибокою цифровізацією, впровадженням AI/Big Data, високим ступенем автоматизації обладнання та повною інтеграцією з логістичними платформами. APM Terminals лідирує в автоматизації (AGV, автономні крани) і TOS, але дещо поступається в аналітичному блоці. DP World має сильну централізовану цифрову інфраструктуру, проте ще не реалізував повну інтеграцію новітніх AI-рішень. MSC (TiL) демонструє поки помірний рівень цифровізації, зосереджуючись радше на операційній експансії, ніж на технологічному прориві.

Загалом, запропонований метод, заснований на розрахунку середнього арифметичного чотирьох базових цифрових критеріїв, є: простим і доступним у застосуванні; прозорим з погляду інтерпретації результатів; зручним для візуалізації динаміки цифрової зрілості; ефективним для швидкої оцінки поточного рівня цифрової трансформації портових операторів; придатним для порівняння та кластерного аналізу гравців глобального ринку.

Водночас, застосування такого методичного підходу має низку суттєвих обмежень, зумовлених його спрощеним характером:

– однакова вага всіх критеріїв не відображає їхньої реальної значущості в цифровій трансформації. Наприклад, впровадження AI або Big Data часто має значно більший вплив на продуктивність і адаптивність, ніж базова інтеграція з клієнтами;

– відсутність механізмів коригування на проривні технологічні досягнення. Компанії, що демонструють лідерство у певному напрямі (скажімо, повна автономізація обладнання), не отримують адекватного відображення цього у загальному індексі;

– ігнорується стратегічна відмінність між операторами хабових мегапортів і регіональних терміналів, для яких цифрові вимоги та технологічні потреби можуть кардинально відрізнятися;

– бракує гнучких параметрів для врахування політичних, геоекономічних чи регіональних чинників, які можуть як стимулювати, так і обмежувати темпи цифровізації.

Таким чином, підхід на основі середнього арифметичного значення чотирьох критеріїв цифрової адаптації (TOS, автоматизація, інтеграція з клієнтами, цифрові технології) є прозорим, зручним і доцільним як інструмент первинного аналізу. Він дозволяє швидко оцінити рівень цифрової зрілості GTO та відстежити основні тенденції цифрових змін у портовій галузі.

5. Вагова модель індексу цифрової зрілості GTO: підходи до вдосконалення та порівняльний аналіз.

З огляду на виявлені вище методичні обмеження базового підходу до оцінювання технологічної зрілості, запропоновано альтернативний метод, що грунтується на застосуванні вагових коефіцієнтів. Такий підхід:

– враховує диференційовану значущість кожного з чотирьох ключових напрямів цифрової трансформації (табл. 5);

Таблиця 5

Структура критеріїв і значення вагових коефіцієнтів у методі оцінювання цифрової зрілості глобальних термінальних операторів

№	Критерій	Позначення	Вага (%)	Ваговий коефіцієнт
1	Інформаційні системи управління терміналом	TOS	25	0,25
2	Автоматизація обладнання	EA	20	0,20
3	Інтеграція з клієнтами та партнерами	CPI	15	0,15
4	Цифрові технології та аналітика	DTA	40	0,40

– забезпечує більш точну відповідність між рівнем цифрової адаптації та стратегічною ефективністю глобального термінального оператора (GTO);

– дає змогу гнучко ранжувати GTO відповідно до їхніх технологічних пріоритетів і сильних сторін (табл. 5);

– легко адаптується до особливостей регіонального середовища або галузевих умов;

– нормалізується у межах 5-бальної шкали, що гарантує порівнюваність результатів (табл. 6).

Таблиця 6

Рейтинг технологічної зрілості (ТЗ) провідних GTO (2025) з урахуванням вагових коефіцієнтів

Оператор	TOS	EA	CPI	DTA	Індекс ТЗ GTO’
PSA International	5	4	5	5	4,80
APM Terminals	5	5	4	4	4,45
DP World	4	4	4	3	3,60
Hutchison Ports	3	3	4	3	3,15
China Merchants Ports	3	3	3	2	2,60
COSCO Shipping Ports	3	3	3	2	2,60
MSC Group (TIL Terminals)	2	2	3	2	2,15

Формула для розрахунку індексу технологічної зрілості глобальних термінальних операторів з урахуванням вагових коефіцієнтів має наступний вигляд:

$$Індекс\ ТЗ\ GTO' = TOS \cdot 0{,}25 + EA \cdot 0{,}20 + CPI \cdot 0{,}15 + DTA \cdot 0{,}40. \quad (3)$$

Цей формалізований методичний підхід дозволяє:

– враховувати нерівнозначний внесок кожного напряму розвитку у загальну цифрову зрілість портового оператора;

– формувати типологію GTO за рівнем цифрової трансформації;

– застосовувати індекс як базовий аналітичний інструмент для стратегічного планування, інвестиційного аналізу, бенчмаркінгу та цифрового позиціювання в індустрії.

Результати розрахунків порівняльних індексів технологічної зрілості провідних глобальних термінальних операторів на основі застосування диференційованих вагових коефіцієнтів наведені у таблиці 6 та візуалізовані на відповідній діаграмі (рис. 4).

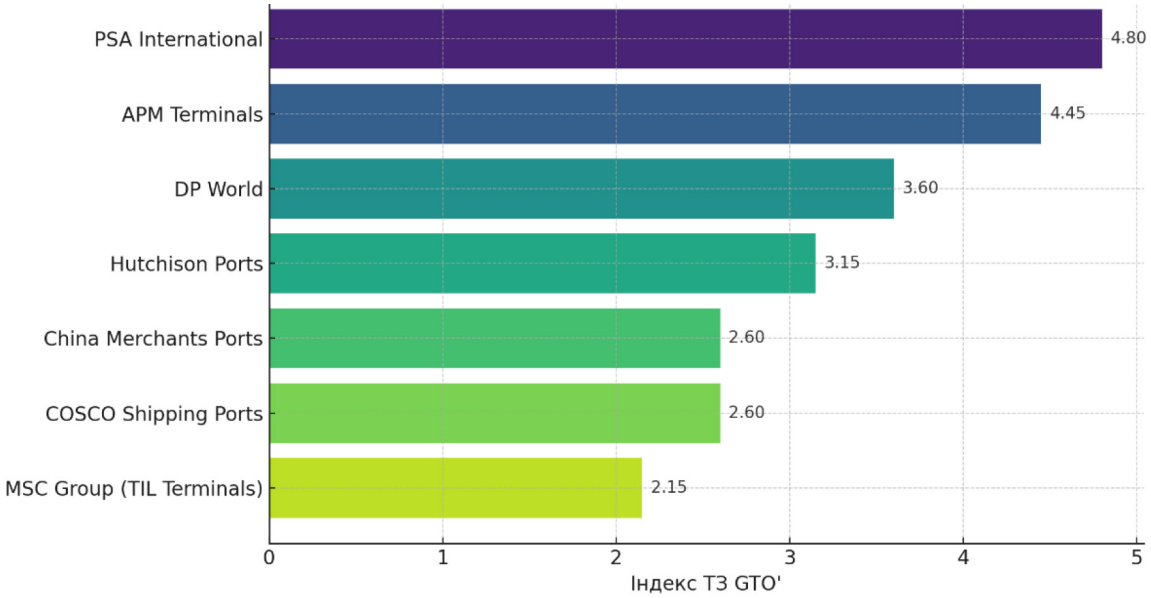


Рис. 4. Рейтинг технологічної зрілості глобальних термінальних операторів (2025) за Індексом ТЗ GTO’ з урахуванням вагових коефіцієнтів

Аналітичний висновок. Очікувано, лідером рейтингу виступає портовий оператор PSA International з найвищим індексом цифрової зрілості – 4,80, що підтверджує його роль як технологічного лідера у глобальній портовій індустрії. На другому місці – APM Terminals із значенням індекса – 4,45, що активно інвестує в автономізацію обладнання та цифрову інтеграцію клієнтських сервісів. У нижній частині рейтингу знаходиться MSC Group (TIL Terminals) з індексом 2,15 – портовий оператор, який лише починає системну цифрову трансформацію свого термінального бізнесу.

Зіставлення оцінок China Merchants Ports і COSCO Shipping Ports демонструє повний збіг значень цифрової зрілості. Це дає підстави для таких висновків:

– по-перше, це свідчити про технологічний паритет між компаніями. Вони знаходяться на однаковому рівні розвитку у сфері цифровізації, автоматизації та інтеграції з клієнтами, що вказує на подібні підходи до модернізації термінальної інфраструктури;

– по-друге, така подібність у показниках зумовлена особливостями китайської моделі управління державними компаніями. Обидва оператори прямо або опосередковано пов'язані з державним капіталом, а їхня діяльність формується під впливом загальнонаціональних стратегічних орієнтирів, зокрема в рамках ініціативи «Один пояс – один шлях». Це створює умови для реалізації уніфікованих технологічних рішень;

– по-третє, подібність у рівні цифрової зрілості свідчити про наявність певної технологічної інерції. Впровадження інновацій у таких структурах відбувається за шаблонною моделлю, без достатньої гнучкості та адаптації до вимог конкретних ринків. Такий підхід може обмежувати здатність компаній конкурувати з більш динамічними та клієнтоорієнтованими операторами, такими, як PSA International чи APM Terminals.

З огляду на це, компаніям доцільно переглянути свої цифрові стратегії, активізувати інвестиції в інновації, адаптувати технологічні рішення до регіональних умов та посилити клієнтоорієнтованість. Це дозволить їм підвищити свою позицію в рейтингах цифрової зрілості та зміцнити конкурентоспроможність у глобальному середовищі.

Таким чином, ваговий підхід дозволяє здійснити глибший, структурований аналіз цифрової зрілості, диференціюючи вплив окремих індикаторів на загальну інноваційну стійкість GTO. Така модель може бути інтегрована в стратегічне планування, інвестиційне моделювання та аналітичну оцінку цифрової трансформації портової галузі.

Висновки

1. Глобальна контейнерна індустрія зазнає глибоких трансформацій під впливом екстремальних подій, структурних змін у глобальній торгівлі, геополітичної турбулентності та прискореної цифровізації. Період 2019–24 рр. засвідчив, що галузь контейнерних перевезень і портова інфраструктура демонструють відносну стійкість до глобальних шоків – таких як пандемія, війна, торговельні війни та ланцюгові збої – однак їх наслідки суттєво вплинули на структуру і стратегії провідних гравців ринку.

2. На цьому тлі провідні глобальні термінальні оператори (GTO) активізували процеси інтернаціоналізації та структурної перебудови, що включають як злиття та поглинання, так і диверсифікацію географії активів. Особливої актуальності набули адаптаційні стратегії, зокрема:

– локалізація управління, як реакція на зростання регуляторного тиску;

– публічно-приватне партнерство, як механізм входу на ринки зі складним інституційним середовищем;

– цифровізація та автоматизація, що стали відповіддю на необхідність забезпечення операційної ефективності та гнучкості;

– структурна гнучкість, зокрема створення альянсів або спільних підприємств, як відповідь на інституційні та геоекономічні обмеження.

Оцінка рівня технологічної зрілості GTO на основі розробленої авторської моделі свідчить, що найбільш динамічними та інноваційними є PSA International та APM Terminals, які активно впроваджують інтелектуальні цифрові рішення та автоматизовані технології. Натомість такі портові оператори, як MSC Group (TiL Terminals), China Merchants Ports та COSCO Shipping Ports, демонструють нижчий рівень цифрової зрілості, що може обумовлюватися як стратегією поступового розвитку, так і інституційними або управлінськими обмеженнями.

Ідентичні показники COSCO та China Merchants Ports свідчать про наявність технологічного паритету, обумовленого спільним державним регулюванням і типовим підходом до цифрової трансформації, що обмежує їхню індивідуалізацію та адаптивність на глобальних ринках.

Водночас, порівняльний аналіз двох методик оцінки цифрової зрілості – з рівномірною та зваженою оцінкою критеріїв – засвідчив, що другий підхід є більш точним та релевантним. Застосування вагових коефіцієнтів дозволяє краще врахувати нерівнозначний внесок окремих компонентів цифрової трансформації у загальну конкурентоспроможність GTO, а також виявити лідерів у ключових сферах (наприклад, AI/Big Data або TOS).

Таким чином, дослідження підтвердило важливість переходу до стратегічно вивіреного управління цифровою трансформацією у глобальній термінальній індустрії. Запропонована модель може слугувати інструментом моніторингу, інвестиційного бенчмаркінгу та підтримки прийняття рішень щодо модернізації та цифрового розвитку морських терміналів у контексті мінливої глобальної кон'юнктури.

Список використаної літератури

1. Weerawardena, J., Mort, G. S., Liesch, P. W., Knight, G. Conceptualizing accelerated internationalization in the born global firm: A dynamic capabilities perspective, Journal of World Business, 2007. Vol. 42, pp. 294–306. doi: https://doi.org/10.1016/j.jwb.2007.04.004

2. Parola, F., Notteboom, T., Satta, G., & Rodrigue, J-P. The impact of multiple-site acquisitions on corporate growth patterns of international terminal operators. International Journal of Shipping and Transport Logistics, 2015. Vol. 7(5): pp. 621–648. doi: http://dx.doi.org/doi:10.1504/IJSTL.2015.072018

3. Olivier, D., Parola, F., Slack, B. and Wang, J. The time scale of internationalization: the case of the container port industry, Maritime Economics & Logistics, 2007, Vol. 9 No.1, pp. 1–34. doi: https://doi.org/10.1057/PALGRAVE.MEL.9100169

4. Satta, G., Parola, F., Persico, L. Temporal and Spatial Constructs in Service Firms. Internationalization Patterns: The Determinants of the Accelerated Growth of Emerging MNEs, Journal of International Management, 2014. Vol. 20(4): pp. 1–15. doi: dx.doi.org/10.1016/j.intman.2014.05.001

5. Notteboom, T., Rodrigue, J-P. Maritime container terminal infrastructure, network corporatization, and global terminal operators: Implications for international business policy. J Int Bus Policy Vol. 6, pp. 67–83 (2023). doi: https://doi.org/10.1057/s42214-022-00142-z

6. Parola, F., Notteboom, T., Satta, G., & Rodrigue, J-P. Analysis of factors underlying foreign entry strategies of terminal operators in container ports. Journal of Transport Geography, 2013, Vol. 33: pp. 72–84. doi: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.09.010

7. Кириллова О. В., Кириллова В. Ю. Класичні системи управління портами та їх концептуальні моделі. Наукові вісті Далівського університету. 2023. No 24. doi: https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24

8. Проблеми функціонування та розвитку портів: монографія / О. В. Кириллова та ін.; за ред. О. В. Кириллової, І. М. Іванової. Львів; Торунь : Liha-Pres, 2022. Т. 7. 438 с. ISBN 978-966-397-289-3. ISSN 2663-9858. doi: https://doi.org/10.36059/978-966-397-289-3

9. Ромах В. Л. Формування моделі управління морськими портами. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34(73) № 4. С. 261–265. doi: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/42

10. Кириллова О. В., Кириллова В. Ю., Магамадов О. Р., Ромах В. Л. Smart port: новітні технології і міжнародний досвід їх упровадження. Transport development. 2024. С. 62–74. doi: https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.06

11. Notteboom, T., Verhoeven, P., Fontanet, M. Current practices in European port on the awarding of seaport terminals to private operators: towards an industry good practice guide, Maritime Policy & Management, 2012, Vol. 39 No.1, pp. 107–123. doi: http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2011.642315

12. Parola, F., Satta, G., Persico, L., Di Bella, E. Entry mode choices in international markets: examining the antecedents of service firms strategies, International Journal of Globalization and Small Business, 2013 Vol. 5 No.1/2, pp. 34–57. doi: http://dx.doi.org/10.1504/IJGSB.2013.050483

13. Notteboom, T., Rodrigue J-P. Port Regionalization: Towards a New Phase in Port Development, Maritime Policy and Management, Vol. 32, 2005, No. 3, pp. 297–313. doi: https://doi.org/10.1080/03088830500139885

14. Notteboom, T., Rodrigue J-P. Foreland-Based Regionalization: Integrating Intermediate Hubs with Port Hinterlands, Research in Transportation Economics, Vol. 27, 2010, pp. 19-29. doi: https://doi.org/10.1016/j.retrec. 2009.12.004

15. Notteboom T., Pallis A, Rodrigue Rodrigue J-P. Port Economics, Management and Policy, New York: 2022, Routledge, 690 pages / 218 illustrations. – URL: https://porteconomicsmanagement.org/

16. Кириллова О. В., Кириллов В. Ю. Теоретичні основи просторової та функціональної еволюції портів. Транспортні системи і технології. 2022. № 40. С. 170–189. doi: https://doi.org/10.32703/2617-9040-2 022-40-15

17. Review of maritime transport 2024: Navigating maritime chokepoints. 166c. – URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf

18. Unctad stat Data centre. – URL: https://unctadstat.unctad.org/EN/ Index.html

19. Drewry Shipping Consultants. Annual Review of Global Container Terminal Operators, London, UK. 436 pages. – URL: https://www.drewry.co.uk/ maritime-research-products/maritime-research-products/ global-container-terminal-operators-annual-review-and-forecast-202425

20. Trans.info. 7 global port operators now handle over 40 % of global port throughput, says Drewry. – URL: https://trans.info/en/7-global-port-operators-394811

21. Maersk. URL: https://www.maersk.com/

22. MSC. URL: https://www.msc.com/

23. Кириллова О. В., Кириллова В. Ю., Магамадов О. Р. Поняття «Smart Port» у контексті глобальних тенденцій інтеграції інтелектуальних транспортних та інформаційних технологій у портовій індустрії // Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 35(74), № 5, Видавничий дім «Гельветика», 2024. С. 81-87. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/14

24. Кириллова О. В., Кириллова В. Ю. «Smart Ports» як інноваційний вектор технологічної трансформації та цифровізації портів: від ідеї до концепції та практичної реалізації // Розвиток транспорту. Транспортні технології (за видами). 2024. № 4(23). С. 77–95. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2024.4-23.07

References

1. Weerawardena, J., Mort, G. S., Liesch, P. W., Knight, G. (2007). Conceptualizing accelerated internationalization in the born global firm: A dynamic capabilities perspective, Journal of World Business, 2007. 42, pp. 294–306. doi: https://doi.org/10.1016/j.jwb.2007.04.004

2. Parola, F., Notteboom, T., Satta, G., & Rodrigue, J-P. (2015). The impact of multiple-site acquisitions on corporate growth patterns of international terminal operators. International Journal of Shipping and Transport Logistics, 7(5): pp. 621–648. doi: http://dx.doi.org/doi:10.1504/IJSTL.2015.072018

3. Olivier, D., Parola, F., Slack, B. and Wang, J. (2027) The time scale of internationalization: the case of the container port industry, Martime Economics & Logistics, 9 (1), pp.1-34. doi: https://doi.org/10.1057/PALGRAVE.MEL.9100169

4. Satta, G., Parola, F., Persico, L. (2014) Temporal and Spatial Constructs in Service Firms. Internationalization Patterns: The Determinants of the Accelerated Growth of Emerging MNEs, Journal of International Management, 20(4). pp. 1–15. doi: dx.doi.org/10.1016/j.intman.2014.05.001

5. Notteboom, T., Rodrigue, J-P. (2023). Maritime container terminal infrastructure, network corporatization, and global terminal operators: Implications for international business policy. J Int Bus Policy 6, pp. 67–83. doi: https://doi.org/10.1057/s42214-022-00142-z

6. Parola, F., Notteboom, T., Satta, G., & Rodrigue, J-P. (2013). Analysis of factors underlying foreign entry strategies of terminal operators in container ports. Journal of Transport Geography, 33, pp. 72–84. doi: https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.09.010

7. Kyryllova O. V., Kyryllova V. Y. (2023). Classical port management systems and their conceptual models [Klasychni systemy upravlinnia portamy ta yikh kontseptualni modeli]. Scientific news of Daliv University, 24. doi: https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24 [in Ukrainian].

8. Problems of functioning and development of ports [Problemy funktsionuvannia ta rozvytku portiv]. Volume 7. Monograph. O. V. Kyryllova, V. M. Piterska, O. R. Mahamadov, D. M. Reshetkov, T. Ie. Korniiets and other; edited by O. V. Kyryllova, I. M. Ivanova. Lviv-Torun : Liha-Pres, 2022. 438 p. doi: https://doi.org/10.36059/978-966-397-289-3 [in Ukrainian].

10. 9. Romakh V. L. (2023). Formation of a model of seaport management. [Formuvannya modeli upravlinnya mors′kymy portamy] Scientific notes of the V.I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences. 34 (73) (4) pp. 261–265. doi: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/42 [in Ukrainian].

11. Notteboom, T., Verhoeven, P., Fontanet, M. (2012). Current practices in European port on the awarding of seaport terminals to private operators: towards an industry good practice guide, Maritime Policy & Management, 39(1), pp. 107–123. doi: http://dx.doi.org/10.1080/03088839.2011.642315

12. Parola, F., Satta, G., Persico, L., Di Bella, E. (2013). Entry mode choices in international markets: examining the antecedents of service firms strategies, International Journal of Globalization and Small Business, 5(1/2), pp. 34–57. doi: http://dx.doi.org/10.1504/IJGSB.2013.050483

13. Notteboom, T., Rodrigue J. P. Port Regionalization: Towards a New Phase in Port Development, Maritime Policy and Management, 32(3), pp. 297–313. doi: https://doi.org/10.1080/03088830500139885

14. Notteboom, T., Rodrigue J-P. (2020). Foreland-Based Regionalization: Integrating Intermediate Hubs with Port Hinterlands, Research in Transportation Economics, 27, pp. 19-29. doi: https://doi.org/10.1016/j.retrec. 2009.12.004

15. Notteboom T., Pallis A, Rodrigue Rodrigue J-P. Port Economics, Management and Policy, New York: 2022, Routledge, 690 pages / 218 illustrations. – URL: https://porteconomicsmanagement.org/

16. Kyryllova O. V., Kyryllova V. Y. (2022) The oretical foundations of spatial and functional evolution of ports [Teoretychni osnovy prostorovoi ta funktsionalnoi evoliutsii portiv]. Transport systems and technologies, (40), 170–189. doi: https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-15 [in Ukrainian].

17. Review of maritime transport 2024: Navigating maritime chokepoints. 166c. – URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024_en.pdf

18. Unctad stat Data centre. – URL: https://unctadstat.unctad.org/EN/ Index.html

19. Drewry Shipping Consultants. Annual Review of Global Container Terminal Operators, London, UK. 436 pages. – URL: https://www.drewry.co.uk/ maritime-research-products/maritime-research-products/ global-container-terminal-operators-annual-review-and-forecast-202425

20. Trans.info. 7 global port operators now handle over 40 % of global port throughput, says Drewry. – URL: https://trans.info/en/7-global-port-operators-394811

21. Maersk. URL: https://www.maersk.com/

22. MSC. URL: https://www.msc.com/

23. Kyryllova O. V., Kyryllova V. Y., Mahamadov O. R. (2024). The concept of "Smart Port" in the context of global trends of integration of intelligent transport and information technologies in the port industry // Scientific journal "Scientific notes of the V. I. Vernadsky TNU. Series: Technical Sciences". Volume 35(74), No. 5, Helvetica Publishing House, 2024. P. 81–87. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/14 [in Ukrainian].

24. Kyryllova O. V., Kyryllova V. Y. (2024). "Smart Ports" as an innovative vector of technological transformation and digitalization of ports: from idea to concept and practical implementation // Transport development. Transport technologies (BY TYPE), 2024. № 4(23). P. 77–95. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2024.4-23.07 [in Ukrainian].

УДК 621.9.02.004.6 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.13

Є. В. КОРБУТ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1221-4052

В. С. ПАРНЕНКО
кандидат технічних наук,
доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1450-2744

О. А. ПЛІВАК
завідувач науково-дослідної (експериментальної) лабораторії НН ММІ
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-3680-8485

Т. П. НІКОЛАЄНКО
кандидат технічних наук,
доцент кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0000-0003-0960-1251

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ДИСКРЕТНИХ ДІЛЯНОК ПОКРИТТЯ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Підвищення зносостійкості робочих поверхонь різального інструменту є ключовим фактором забезпечення його тривалої експлуатації під час обробки складних матеріалів, зокрема полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Одним із перспективних напрямів є створення дискретних покриттів з особливою мікроструктурою, які можуть забезпечити не лише високу твердість і зносостійкість, а й оптимальний розподіл напружено-деформованого стану (НДС) у приповерхневих шарах інструменту. Дослідження по використанню дискретного покриття глобулярной структури, нанесеного методом електро іскрового легування на різальний інструмент зі швидкорізальної сталі для обробки полімерних композитів в теперішній час не проводились. Саме така поверхнева архітектура має потенціал для зменшення рівня залишкових напружень, попередження когезійного розтріскування покриття та утворення тріщин, що знижують ресурс інструменту.

В умовах високих динамічних навантажень під час різання полімерних композитів, доцільність застосування неперервного захисного шару викликає сумніви через схильність до виникнення тріщин при температурних коливаннях і локалізованих деформаціях. Натомість, дискретне покриття дозволяє розподілити напруження більш рівномірно, локалізувати пошкодження в окремих ділянках та уникати їхнього поширення по всій поверхні. Важливо зазначити, що геометрія та розміри окремих дискретних елементів покриття мають вирішальний вплив на формування залишкових напружень, характер контакту з оброблюваним матеріалом та загальну ефективність процесу різання.

У статті акцентується увага на необхідності розробки науково обґрунтованого підходу до визначення оптимальних розмірів та форми дискретних ділянок захисного покриття з урахуванням вимог до міцності, довговічності та технологічності нанесення. Такий підхід має враховувати вплив параметрів покриття на НДС, з урахуванням особливостей роботи інструменту з ПКМ, які відзначаються високою абразивністю, низькою теплопровідністю та схильністю до нашарування матеріалу на ріжучу кромку.

Проведення відповідних досліджень дозволить сформувати рекомендації щодо раціональної архітектури покриттів, які забезпечуватимуть підвищену стійкість інструменту та стабільність параметрів обробки. У підсумку, впровадження дискретних покриттів з контрольованими геометричними характеристиками відкриває нові можливості для створення ефективного інструменту, призначеного для високопродуктивної обробки полімерних композитів з мінімальними втратами на знос і ремонт.

Для вирішення питання розробки архітектури модифікованого поверхневого шару різального інструменту необхідно розробити підхід, щодо визначення залежності НДС покриття від розмірів та форми дискретних ділянок покриття.

Ключові слова: *захисні покриття, міцність покриттів, різальний інструмент, полімерні композити, залишкові напруження, когезійне розтріскування, тріщина.*

YE. V. KORBUT
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-1221-4052

V. S. PARNENKO
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-1450-2744

O. A. PLIVAK
Head of the Research (Experimental) Laboratory of the Educational
and Scientific Mechanical Engineering Institute
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0003-3680-8485

T. P. NIKOLAIENKO
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Descriptive Geometry
and Engineering Graphics
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0003-0960-1251

DETERMINING THE DIMENSIONS OF DISCRETE COATING SECTIONS FOR TOOLS USED IN POLYMER COMPOSITE MACHINING

Improving the wear resistance of cutting tool working surfaces is a key factor in ensuring their long service life during the machining of complex materials, particularly polymer composite materials (PCMs). One promising direction is the development of discrete coatings with a special microstructure, which not only provide high hardness and wear resistance but also ensure optimal distribution of the stress–strain state (SSS) in the subsurface layers of the tool. To date, no studies have been conducted on the use of discrete globular-structure coatings applied by electro-spark alloying to high-speed steel cutting tools for machining polymer composites. This type of surface architecture has the potential to reduce residual stresses, prevent cohesive cracking of the coating, and mitigate the formation of cracks that shorten tool life.

Under high dynamic loads during polymer composite machining, the use of continuous protective coatings is questionable due to their susceptibility to cracking caused by thermal fluctuations and localized deformations. In contrast, discrete coatings allow for more uniform stress distribution, localization of damage in specific areas, and prevention of its propagation across the entire surface. It is important to note that the geometry and dimensions of individual discrete coating elements have a decisive influence on the formation of residual stresses, the nature of contact with the workpiece material, and the overall cutting efficiency.

This article emphasizes the need to develop a scientifically based approach to determine the optimal sizes and shapes of discrete protective coating elements, taking into account strength requirements, durability, and the feasibility of the coating process. Such an approach should consider the influence of coating parameters on the SSS, considering the specific working conditions of tools used for PCMs, which are characterized by high abrasiveness, low thermal conductivity, and a tendency to adhere to the cutting edge.

Conducting the appropriate research will help formulate recommendations on the rational architecture of coatings that ensure improved tool durability and stability of machining parameters. Ultimately, the implementation of discrete coatings with controlled geometric characteristics opens up new opportunities for creating efficient tools designed for high-performance machining of polymer composites with minimal wear and repair losses.

To address the issue of developing a modified surface layer architecture for cutting tools, an approach must be developed to determine the dependence of the coating's SSS on the size and shape of the discrete coating elements.

Key words: *protective coatings, coating strength, cutting tools, polymer composites, residual stresses, cohesive cracking, crack.*

Постановка проблеми

Збільшення частки використання композиційних матеріалів в різних галузях промисловості, а саме волокнистих полімерних композитних матеріалів (ВПКМ), та зважаючи на їх фізико – механічні властивості, а саме анізотропію їх властивостей обумовлює використання різального інструменту (РІ) підвищеної працездатності, що забезпечує продуктивність обробки без втрати якості отриманого виробу. Одним із шляхів рішення зазначених проблем є формування на робочих поверхнях інструмента захисного зносостійкого покриття. Використання покриттів дає можливість найбільш раціонально і економічно використовувати фізико-механічні властивості інструментальних матеріалів, замінити дорогі сталі та сплави і, в більшості випадків, підвищити працездатність та надійність деталей машин і РІ.

Вирішення поставленої задачі дозволить підвищити ресурс РІ та забезпечити якість отриманих виробів деталей з ПКМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із ключових напрямів підвищення працездатності різального інструменту (РІ) є зменшення тертя та покращення зносостійкості його робочих поверхонь. Застосування зносостійких покриттів дозволяє значно – у декілька разів – збільшити довговічність інструменту [1, 2].

Відомо, що властивості покриттів суттєво залежать від вибору методу та режимів їх нанесення, складу покриття і матеріалу основи. Зокрема, температура формування покриття впливає на його мікроструктуру та когезійно – адгезійну міцність системи «основа – покриття». Висока адгезія забезпечується як молекулярними взаємодіями, так і розвитком дифузійних процесів із формуванням зон взаємної дифузії, навіть за наявності чіткої межі між покриттям і основою [3, 4].

Однак тонкі покриття в умовах абразивного зношування демонструють обмежену довговічність, що зумовлює широке впровадження багатофункціональних багатошарових систем. Такі покриття поєднують високу твердість, низьку адгезію до оброблюваного матеріалу, знижений коефіцієнт тертя та підвищену стійкість до абразивного зношування й окислення при підвищених температурах.

Особливу увагу дослідники приділяють формуванню модифікованих поверхневих шарів із підвищеною когезійною, адгезійною та контактною міцністю. Встановлено, що важливим чинником забезпечення міцності є мінімізація напружено-деформованого стану (НДС) у системі «основа – покриття». З цією метою запропоновано концепцію заміни традиційного суцільного покриття на дискретну структуру, що дає змогу обмежити максимальні напруження як у модифікованому шарі, так і в зоні його адгезійного контакту з основою. Параметри дискретних елементів – їх розмір і просторову архітектуру – визначають виходячи з умов оптимізації НДС за силових і температурних навантажень.

У роботах [5, 6, 7] показано, що застосування дискретного, сформованого методом електроіскрового легування (ЕІЛ), дозволяє замість одного потужного концентратора напружень, характерного для суцільного покриття, створити множину локалізованих дискретних ділянок. Кожна з них виступає як незалежний концентратор напружень меншої інтенсивності, що не перевищує рівень адгезійної та когезійної міцності модифікованого шару. Такий підхід сприяє формуванню однорідного НДС як у товщі глобул, так і в зоні адгезійного контакту, що відповідає принципу Шарпі [8, 9].

Проте зазначені дослідження стосуються переважно різання традиційних конструкційних сталей. Наразі відсутні відомості щодо застосування дискретних глобулярних покриттів, сформованих методом ЕІЛ, для обробки волокнистих полімерних композитних матеріалів (ВПКМ). Таким чином, актуальним є дослідження не лише стійкісних характеристик таких покриттів під час обробки ВПКМ, а й впливу розміру дискретних елементів та їх просторової архітектури на якість обробленої поверхні.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є розробка науково обґрунтованого підходу до визначення оптимальних розмірів дискретних ділянок покриття різального інструменту, призначеного для обробки полімерних композиційних матеріалів, на поверхнях які піддаються когезійному розтріскуванню. Основна увага зосереджена на формуванні дискретної архітектури поверхневого шару, яка забезпечує рівномірний розподіл напружено-деформованого стану (НДС), зменшення рівня залишкових напружень, а також запобігання когезійному руйнуванню покриття та розвитку тріщин. Обґрунтовано вибір конструктивних параметрів дискретного шару – таких як геометрія, розміри, щільність та товщина дискретних елементів – з метою забезпечення мінімізації концентрації напружень і підвищення міцності та довговічності інструменту в умовах обробки високоабразивних полімерних композитів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для проектування покриттів дискретного типу глобулярної структури на робочих поверхнях різального інструменту необхідно визначити наступні геометричні параметри: відстань між дискретними ділянками, розміри ділянок в плані, товщина поверхневого шару за умовою досягнення мінімального рівня залишкових і експлуатаційних напружень, що було запропоновано в джерелах [10, 11, 12, 13]. Для цього необхідно визначити НДС при різних видах навантажень – розтязі, повздовжньому стиску, контактному навантаженню.

Під впливом нормальних напружень, що виникають в покритті внаслідок дії зовнішнього навантаження та нагрівання інструменту, а також залишкових напружень, які виникають в процесі формування покриття і обумовлені різницею коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів покриття та основи [14], а також наявністю дефектів в покритті може відбутися руйнування зносостійкого покриття шляхом когезійного розтріскування [15].

При розтязі дискретна будова модифікованого поверхневого шару визначається по кроку регулярних тріщин [16]. Визначивши критичний крок можливо визначити конструктивні параметри дискретного покриття. На рис. 1 представлена схема визначення розтвору тріщини. Розтвір тріщини є наслідком «недовантаження» ділянок покриття, прилеглих до тріщини, тобто зниження σ_n до нуля на кромці покриття в зоні тріщини [16]. Розтвір тріщини також підлягає нормальному закону розподілу [17].

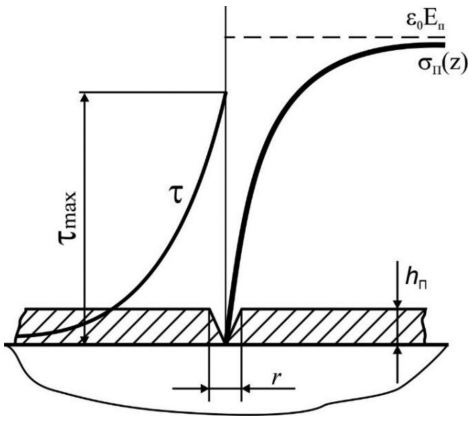


Рис. 1. Схема визначення розтвору тріщини

Визначивши можно прогнозувати відстань між дискретними ділянками в залежності від складу та архітектури покриття.

Напруження в покритті $\sigma_n^{еф}$ по його довжині, розраховуються по залежності:

$$\sigma_n^{еф} = \sigma_n^{екс} + \sigma_n^{зал}, \tag{1}$$

де $\sigma_n^{екс} = \sigma_n^M + \sigma_n^T$ – напруження в покритті, що виникають під дією зовнішнього навантаження; σ_n^M – напруження в покритті, від дії механічного навантаження; σ_n^T – напруження в покритті, що виникають під дією температурного градієнта; $\sigma_n^{зал}$ – залишкові напруження у покритті.

Аналіз рівняння (1) показує, що зменшення залишкових напружень в системі «основа-покриття» $\sigma_n^{зал}$ дозволить підвищити напруження від механічного навантаження σ_n^M, що дозволить підвищити працездатність інструменту з модифікованим поверхневим шаром.

На рис. 2 наведено характер розподілу напружень від механічного навантаження. При експлуатації різального інструменту окрім напружень від механічного навантаження виникають напруження від впливу температури різання. У зв′язку з тим, що однією з основних умов обробки ВПКМ є те що температура в зоні різання не повинна перевищувати температуру деструкції матеріалу ВПКМ-350°, то σ_n^T не враховуємо.

Напруження від дії механічного навантаження визначаємо за формулою [17]:

$$\sigma_n^M = \frac{1}{h_n} \cdot \frac{\varepsilon_{кр}}{\left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_o H_o}\right)} \cdot \left[1 - \frac{\mathrm{ch}(ky)}{\mathrm{ch}(kl)}\right], \tag{2}$$

де $\varepsilon_{кр}$ – критична деформація основи, за перевищенням якої починається когезійне розтріскування; H_o – товщина основи; h_n – товщина покриття; E_o, E_n – модулі пружності основи і покриття; y – проміжна координата, $2l$ – базовий розмір; k – коефіцієнт, який залежить від модулів пружності основи і покриття:

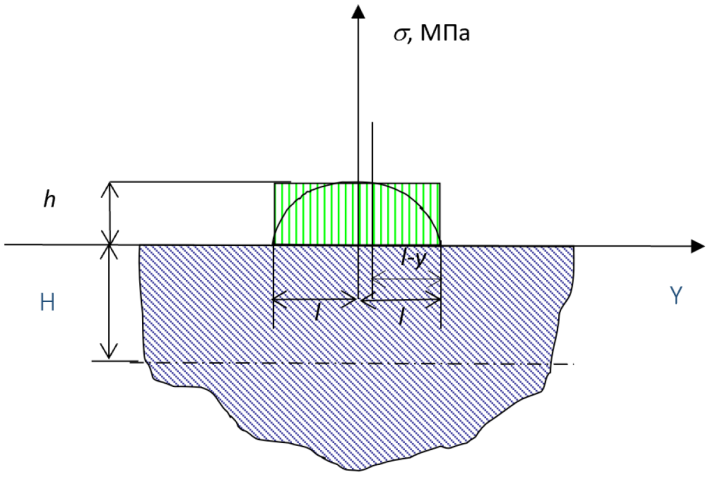


Рис. 2. Епюра напружень σ_n^M по довжині покриття

$$k^2 = 2\frac{G_o G_n}{G_o h_n + G_n H_o}\left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_o H_o}\right), \tag{3}$$

де G_n, G_o – модулі зсуву основи і покриття відповідно.

Фізико-механічні характеристики основи і покриття, необхідні для розрахунку параметрів конструкції покриття приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні параметри основи і покриття

Основа Р6М5			**Покриття $TiCrB_2$ + 25 %AlN**		
***E*$_o$, МПа**	***G*$_o$, МПа**	***H*, мм**	**Еп, МПа**	***G*$_n$, МПа**	***h*, мкм**
$2{,}3 \cdot 10^5$	$9{,}5 \cdot 10^4$	0,5	$2{,}93 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^5$	3–7

Для визначення залишкових напружень, що виникають при формуванні покриття та впливають на напружений стан системи «покриття-основа» визначені методом, описаним в роботі [11, 18] – метод гнучкого зразка, заснований на тому, що під дією залишкових напружень в покритті, довга, вузька і тонка пластинка, на яку нанесено суцільне покриття, деформується у вигляді дуги кола.

У деформованої таким чином пластинки вимірюють прогин або визначають радіус кривизни зразка і по формулах розраховують залишкові напруження [13].

Для визначення залишкових напружень у покриттях на пластинки розміром 200 мм × 15 мм × 0,5 мм із швидкорізальної сталі Р6М5 ($E_n = 2{,}3 \cdot 10^5$ МПа) наносили «квазісуцільне» покриття $TiCrB_2$ +25 % AlN на установці «Элитрон-22».

Під дією залишкових напружень зразок деформувався у вигляді дуги кола. У деформованого зразка заміряли прогин *f*, за величиною якого визначали залишкові напруження (рис. 3).

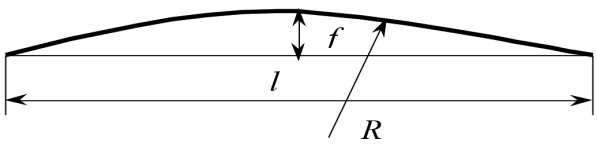


Рис. 3. Розрахункова схема обчислення радіуса кривизни *R* зразка, де *l* хорда сегменту, а *f* – стріла сегменту

Радіус кривизни *R* розраховували через прогин *f* і хорду *l* за залежністю

$$R = \frac{l^2 + 4f^2}{8f}. \tag{4}$$

По даним робіт [11, 13, 14] розраховуємо залишкові напруження в системі «покриття-основа»:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{32E_oH_o^3 f}{3a^2h_n(1-\nu_o)(2H_o+h_n)}, \quad (5)$$

де $2H_o$, h_n – товщини основи і покриття, відповідно; E_o, ν_o – модуль пружності основи першого роду і коефіцієнт Пуасона матеріалу основи, відповідно; f – прогин зразка; a – довжина зразка.

З використанням методу розрахунку тонких пластин на вигин можна визначити $\sigma_n^{зал}$ наступним чином [11, 19]:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{4E_oH_o^3}{3Rh_n(1-\nu_o^2)(2H_o+h_n)}, \quad (6)$$

де R – радіус кривизни, який отримує зразок в результаті деформації, що спричиняється залишковими напруженнями.

В зв'язку з тим, що ми використовуємо покриття малої товщини $h \ll H$, то формулу (6) можна записати у вигляді [13]:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{16E_oH_o^2 f}{3a^2h_n(1-\nu_o)}, \quad (7)$$

а для лінійного напруженого стану:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{16E_oH_o^2 f}{3a^2h_n}. \quad (8)$$

Так як ми маємо лінійно напружений стан при $h \ll H$ залежність (6) перетворюється на відому формулу Стонея [13, 19]:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{2E_oH_o^2}{3Rh_n}. \quad (9)$$

Розрахункові данні залишкових напружень представлені на рис. 4.

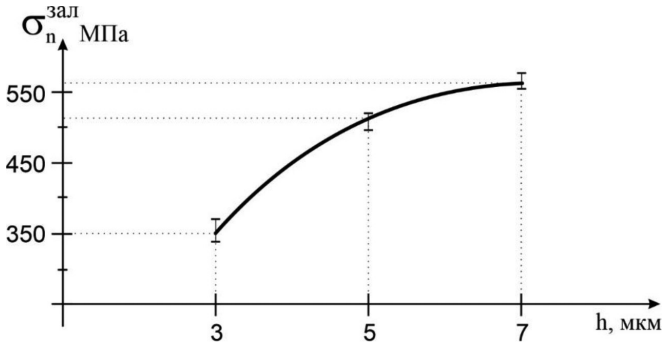


Рис. 4. Залежність залишкових напружень від товщини покриття $TiCrB_2$ + 25 %AlN на швидкорізальній сталі Р6М5

Як видно з залежності залишкові напруження зростають зі збільшенням товщини покриття.

Щоб визначити розміри дискретних ділянок – D, які несхильні когезійному розтріскуванню в залежності від критичної деформації основи та залишкових напружень в покритті без врахування експлуатаційних термонапружень, був розрахований максимальний допустимий крок тріщини – C_n.

Приймаємо, що когезійна міцність покриття $\sigma^{ког} = \varepsilon_{kp}E_n$ в ньому розподілена за нормальним законом з стандартним відхиленням $0{,}1\sigma^{ког}$, то найбільш ймовірно тріщина може виникнути в перетині $(l-y)$ при $\sigma_n^{еф} = 0{,}9\sigma^{ког}$ [11, 13].

Максимально припустимий крок тріщини в суцільному покритті:

$$C_n = -\frac{1}{k}\ln\left(0{,}1 + \frac{\sigma_n^T + \sigma_n^{зал}}{\varepsilon_{kp}E_n}\cdot\left(1+\frac{E_nh_n}{E_oH_o}\right)\right). \quad (10)$$

Максимальний приведений розмір ділянки дискретного покриття:

$$D_{\max} \le C_n \quad (11)$$

Так як в зоні різання ВПКМ температура неповинна перевищувати 350 °С. то залежність (10) можна представити у вигляді (12):

$$C_n = -\frac{1}{k}\ln\left(0{,}1+\frac{\sigma_n^{зал}}{\varepsilon_{kp}E_n}\cdot\left(1+\frac{E_n h_n}{E_o H_o}\right)\right). \quad (12)$$

Розрахункове значення кроку тріщин «С», в залежності від товщини покриття представлені на рис. 5.

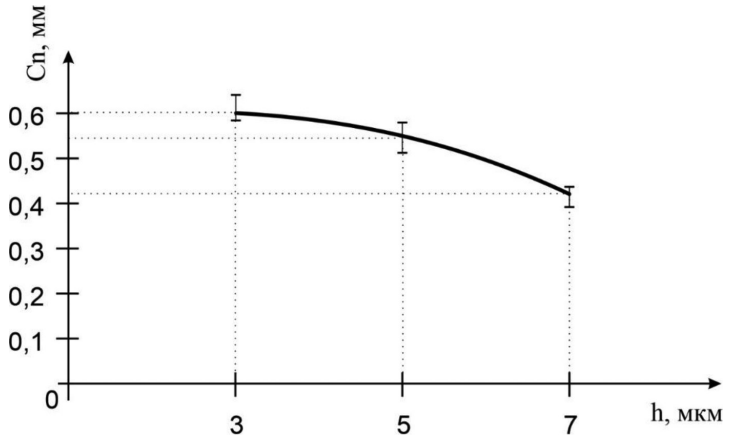


Рис. 5. Розрахункова залежність кроку тріщин від висоти покриття

Згідно літературних джерел [18] та розрахунків $\varepsilon_{кр}$змінюється від 0,6–0,8 %.

Таким чином визначивши максимально припустимий крок тріщини в суцільному покритті та розміри є можливо закласти розміри дискретної ділянки покриття та відстань між ними, з урахуванням експлуатаційних, залишкових напружень та напружень, що виникають від впливу температури, на етапі конструювання різального інструменту з покриттям, що дозволить виключити когезійне розтріскування останнього.

Висновки

У результаті дослідження запропоновано науково обґрунтований підхід до проєктування дискретного зносостійкого покриття глобулярної структури для різального інструменту, призначеного для обробки волокнистих полімерних композитних матеріалів. Показано, що застосування дискретного покриття дає змогу знизити інтенсивність напружень у поверхневому шарі інструменту, що, у свою чергу, забезпечує підвищення когезійної та адгезійної міцності, а також довговічності інструменту. Встановлено, що параметри дискретних елементів покриття, зокрема їх розміри та просторове розташування, суттєво впливають на рівномірність розподілу напружено-деформованого стану в системі «основа – покриття». Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації структури покриттів з метою підвищення ефективності різального інструменту при роботі з композиційними матеріалами.

Список використаної літератури

1. Ляшенко Б. А., Клименко С. А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине // *Сучасне машинобудування*. 1999. № 1. С. 94–104.

2. Ляшенко Б. А., Соловых Є. К., Сорока Є. Б. та ін. Технологические, конструктивные и эксплуатационные особенности упрочняющих покрытий дискретной структуры на деталях машин и инструменте // *Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління: тези доп. III наук.-практ. конф. Серія «Техніка, Технологія»*. Київ, 2005. С. 22–23.

3. Tonshoff H. K., Wobker H.-G., Mohlfeld A., Fritsch A. Einflub der Substratbearbeitung auf das Einsatzverhalten beschichteter Zerspanwerkzeuge // *HTM: Härterei-Technische Mitteilungen*. 1996. Vol. 51, № 4. P. 207–213.

4. Krishnamurthy R. Thermocracking of ceramic cutting tools: bane or boone // *8th Int. Conf. Fract. «Fract. Mech.: Successes and Probl»., Kiev, 8–14 June, 1993: Collect. Abstr. Pt. 2*. Lviv, 1993. P. 663–664.

5. Корбут Є. В., Ляшенко Б. А., Подчерняєва І. І., Юрченко Д. В. Перспективи електроіскрового зміцнення твердосплавного ріжучого інструменту // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 2012. № 12. С. 67–80.

6. Ляшенко Б. А., Антонюк В. С., Сорока О. Б. та ін. Оптимизация дискретных структур электроискровых покрытий // *Артиллерийское и стрелковое вооружение: междунар. науч.-техн. сб*. К., 2004. Вип. 4(13). С. 30–34.

7. Антонюк В. С., Сорока Є. Б. Конструирование дискретно-модифицированных износостойких поверхностей // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2008. № 10. С. 8–13.

8. Антонюк В. С., Ляшенко Б. А., Сорока Є. Б. Выбор параметров покрытий дискретной структуры при модификации поверхности режущего инструмента // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2005. № 3. С. 49–50.

9. Ляшенко Б. А., Сорока Є. Б., Рутковский А. В. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // *Проблемы прочности*. 2002. № 4. С. 119–125.

10. Клименко С. А., Солових Є. К., Сорока Є. Б. та ін. Оптимизация дискретной структуры при поверхностной электроконтактной закалке // *Інженерія поверхні та реновація виробів: матеріали 6-ї міжнар. н.-техн. конф*. Київ–Ялта, 2006. С. 83–85.

11. Антонюк В. С. Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу : дис. д-ра техн. наук. К. : НТУУ «КПІ», 2006. 375 с.

12. Ляшенко Б. А., Новиков Н. В., Клименко С. А. Дискретное модифицирование поверхностного слоя деталей машин и инструментов. К. : ІСМ ім. В. Н. Бакуля, 2017. 264 с.

13. Сорока О. Б. Методологія оптимізації зносостійких покриттів за критеріями міцності і роботоздатності : дис. д-ра техн. наук. К., 2011. 345 с.

14. Корбут Є. В., Парненко В. С., Ніколаєнко Т. П., Даниленко О. В. Архітектура дискретного покриття робочих поверхонь інструменту для різних схем різання // *Технічні науки та технології*. 2024. № 4(38). С. 44–56.

15. Durao L. M., Tavares J. M., Marques A. T. Comparison of Tool Effects on Hybrid Laminates after Drilling // *5th International Conference on Mechanics and Materials in Design*. Porto, 2006. P. 1–14.

16. Ляшенко Б. А., Сорока Є. Б., Рутковський А. В. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // *Проблемы прочности*. 2002. № 4. С. 119–125.

17. Vetter J., Burgmer W., Dederichs H., Perry A. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating // *Materials Science Forum*. 1994. Vols. 163–165. P. 527–532.

18. Ляшенко Б. А., Новиков Н. В., Клименко С. А. Дискретное модифицирование поверхностного слоя деталей машин и инструмента. К. : ІСМ ім. В. Н. Бакуля, 2017. 264 с.

19. Калініченко В. І., Марчук В. Є., Корбут Є. В. Напружено-деформований стан різального інструменту з дискретним покриттям // *Проблеми тертя та зношування*. Київ : НАУ, 2017. Вип. 1(74). С. 104–109.

References

1. Liashenko, B. A., & Klimenko, S. A. (1999). Tendentsii razvitiia uprochniaiushchei poverkhnostnoi obrabotki i polozhenie v Ukraine [Trends in the development of surface hardening treatment and the situation in Ukraine]. *Suchasne Mashynobuduvannia*, (1), 94–104. [in Russian]

2. Liashenko, B. A., Solovykh, E. K., Soroka, E. B., et al. (2005). Tekhnologicheskie, konstruktivnye i ekspluatatsionnye osobennosti uprochniaiushchikh pokrytii diskretnoi struktury na detaliakh mashin i instrumente [Technological, design, and operational features of hardening coatings with discrete structure on machine parts and tools]. In *Problemy ta perspektyvy rozvytku transportnykh system: tekhnika, tekhnolohiia, ekonomika i upravlinnia. Tezy dopovidei tretoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Seriia "Tekhnika, Tekhnolohiia"* (pp. 22–23). Kyiv. [in Russian].

3. Tonshoff, H. K., Wobker, H.-G., Mohlfeld, A., & Fritsch, A. (1996). Einfluss der Substratbearbeitung auf das Einsatzverhalten beschichteter Zerspanwerkzeuge [Influence of substrate processing on the performance of coated cutting tools]. *HTM: Härterei-Technische Mitteilungen*, 51(4), 207–213. [in German]

4. Krishnamurthy, R. (1993). Thermocracking of ceramic cutting tools: Bane or boon. In *8th International Conference on Fracture: Fracture Mechanics: Successes and Problems*, Kiev, June 8–14, 1993 (Pt. 2, pp. 663–664). Lviv. [in English].

5. Korbut, E. V., Liashenko, B. A., Podcherniaeva, I. I., & Yurchenko, D. V. (2012). Perspektivy elektroiskrovogo uprochneniia tverdosplavnogo rezhushchego instrumenta [Prospects of electro-spark hardening of carbide cutting tools]. *Protsesy Mekhanichnoi Obrabotky v Mashynobuduvanni*, (12), 67–80. [in Russian].

6. Liashenko, B. A., Antoniuk, V. S., Soroka, O. B., et al. (2004). Optimizatsiia diskretnykh struktur elektroiskrovykh pokrytii [Optimization of discrete structures of electro-spark coatings]. *Artylleriiskoe i Strelkovoe Vooruzhenie: Mezhdunarodnyi Nauchno-Tekhnicheskii Sbornik*, (4), 30–34. [in Russian]

7. Antoniuk, V. S., & Soroka, E. B. (2008). Konstruirovanie diskretno-modifitsirovannykh iznosostoikikh poverkhnostei [Designing discretely modified wear-resistant surfaces]. *Uprochniaiushchie Tekhnologii i Pokrytiia*, (10), 8–13. [in Russian]

8. Antoniuk, V. S., Liashenko, B. A., & Soroka, E. B. (2005). Vybor parametrov pokrytii diskretnoi struktury pri modifikatsii poverkhnosti rezhushchego instrumenta [Selection of parameters of discrete structure coatings during modification of cutting tool surfaces]. *Uprochniaiushchie Tekhnologii i Pokrytiia*, (3), 49–50. [in Russian]

9. Liashenko, B. A., Soroka, E. B., & Rutkovskii, A. V. (2002). Opredelenie parametrov diskretnoi struktury pokrytii s uchetom ostatkovykh napriazhenii [Determination of parameters of discrete structure coatings considering residual stresses]. *Problemy Prochnosti*, (4), 119–125. [in Russian]

10. Klimenko, S. A., Solovykh, E. K., Soroka, E. B., et al. (2006). Optimizatsiia diskretnoi struktury pri poverkhnostnoi elektrokontaktnoi zakalke [Optimization of discrete structure during surface electro-contact hardening]. In *Inzheneriia Poverkhnosti i Renovatsiia Izdelyi: Materialy 6-i Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii*, Kyiv–Yalta (pp. 83–85). [in Russian].

11. Antoniuk, V. S. (2006). Osnovy povysheniia rabotosposobnosti rezhushchego instrumenta putem formirovaniia iznosostoikikh pokrytii diskretnogo tipa [Fundamentals of enhancing the performance of cutting tools by forming wear-resistant coatings of discrete type] (Doctoral dissertation). NTUU "KPI", Kyiv. [in Russian]

12. Liashenko, B. A., Novikov, N. V., & Klimenko, S. A. (2017). Diskretnoe modifitsirovanie poverkhnostnogo sloia detaley mashin i instrumentov [Discrete modification of the surface layer of machine parts and tools]. Kyiv : ISM im. V. N. Bakulia. [in Russian].

13. Soroka, O. B. (2011). Metodolohiia optymizatsii znosostiikykh pokryttiv za kryteriiamy mitsnosti i robotospromozhnosti [Methodology for optimizing wear-resistant coatings based on strength and performance criteria] (Doctoral dissertation). Kyiv. [in Ukrainian]

14. Korbut, Ye. V., Parnenko, V. S., Nikolaienko, T. P., & Danylenko, O. V. (2024). Arkhitektura dyskretnoho pokryttia robochykh poverkhon instrumentu dlia riznykh skhem rizannia [Architecture of discrete coating of working surfaces of tools for different cutting schemes]. *Tekhnichni Nauky ta Tekhnolohii*, (4), 44–56. [in Ukrainian].

15. Durao, L. M., Tavares, J. M., & Marques, A. T. (2006). Comparison of tool effects on hybrid laminates after drilling. In *5th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, Porto (pp. 1–14). [in English].

16. Liashenko, B. A., Soroka, Ye. B., & Rutkovskyi, A. V. (2002). Opredelenie parametrov diskretnoi struktury pokrytii s uchetom ostatochnykh napriazhenii [Determination of parameters of the discrete structure of coatings taking into account residual stresses]. *Problemy prochnosti*, (4), 119–125.

17. Vetter, J., Burgmer, W., Dederichs, H., & Perry, A. (1994). The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating. *Materials Science Forum*, 163–165, 527–532. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.163-165.527 [in English].

18. Liashenko, B. A., Novikov, N. V., & Klimenko, S. A. (2017). Diskretnoe modifitsirovanie poverkhnostnogo sloia detaley mashin i instrumentov [Discrete modification of the surface layer of machine parts and tools]. Kyiv: ISM im. V. N. Bakulia. [in Russian]

19. Kalnichenko, V. I., Marchuk, V. Ye., & Korbut, Ye. V. (2017). Napruzheno-deformovanyi stan rizalnoho instrumentu z dyskretnym pokryttiam [Stress-strain state of cutting tool with discrete coating]. *Problemy Terennia ta Znoshuvannia*, (1), 104–109. [in Ukrainian].

УДК 621.31 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.14

В. В. КУРАК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4303-5671

О. В. АНДРОНОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9597-8068

Є. О. БАГАНОВ
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8771-5735

І. Ф. ПОГРЕБНЯК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-0935-1168

СИСТЕМА ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ З ПРІОРИТЕТНИМ ЖИВЛЕННЯМ ВІД ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

В даній роботі запропоновано систему зовнішнього освітлення з пріоритетним живленням від акумуляторної батареї, що заряджається протягом денного періоду доби від автономної фотоелектричної станції. Розроблена система призначена для зменшення споживання електричної енергії освітлювальною установкою з централізованої мережі.

Автоматичне керування енергетичними потоками між акумуляторною батареєю, мережею і освітлювальними приладами зі встановленням пріоритету живлення від акумуляторної батареї реалізовано на основі двох електромагнітних реле РК-1Р та РК-2Р. Централізована електрична мережа в цій системі виконує роль резервного джерела живлення.

Витримка в часі, що необхідна для уникнення повернення реле РК-1Р у вихідний стан в момент спрацювання реле РК-2Р, забезпечується конденсатором ємністю 260 мкФ, підключеним паралельно до електромагніту реле РК-1Р.

Запуск системи здійснюється автоматично за допомогою фотореле, що спрацьовує при зменшенні рівня освітленості. Поповнення запасу енергії акумуляторної батареї Kijo JDG 12V 65Ah GEL реалізовано з використанням фотоелектричної системи, побудованої на основі кремнієвого фотомодуля 120Р/12 та ШІМ-контролера заряду акумулятора SLC NR2420A. В якості перетворювача постійної напруги акумуляторної батареї 12 В у змінну 220 В частотою 50 Гц застосовано автономний інвертор KONNWEI 2000W.

Розроблену систему впроваджено в Херсонському національному технічному університеті для освітлення внутрішнього подвір'я І навчального корпусу. Дослідним шляхом встановлено, що при використанні в якості освітлювальних приладів двох світлодіодних прожекторів потужністю 30 Вт кожен система забезпечує живлення від акумуляторної батареї протягом 7–8 годин, зменшуючи тим самим споживання електричної енергії з централізованої мережі.

Ключові слова: *освітлювальна установка, заощадження енергії, акумуляторна батарея, централізована електромережа, фотоелектрична система, електромагнітне реле, фотореле, автономний інвертор.*

V. V. KURAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-4303-5671

O. V. ANDRONOVA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-9597-8068

YE. A. BAGANOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8771-5735

I. F. POGREBNIAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-0935-1168

EXTERNAL LIGHTING SYSTEM WITH PRIORITY POWER SUPPLY FROM DC VOLTAGE SOURCE

This paper proposes an outdoor lighting system with priority power supply from a battery charged during the daytime by an autonomous photovoltaic station. The developed system is designed to reduce the electrical energy consumption for lighting from centralized power grid.

Automatic control of energy flows between the battery, centralized power grid and lighting devices with priority for power supply from the battery is realized on the basis of two electromagnetic relays PK-1P and PK-2P. The centralized power grid in this system is used as reserve power source.

The time delay required to avoid PK-1P relay returning to its initial state during triggering of PK-2P relay is provided by a 260 μF capacitor connected in parallel to the PK-1P relay electromagnet.

The system is started automatically due to photo relay that is triggered when the light level decreases. The Kijo JDG 12V 65Ah GEL battery is recharged by photovoltaic system built on a 120P/12 silicon photovoltaic module and a SLC NR2420A PWM battery charge controller. A KONNWEI 2000W standalone inverter is used as a converter of 12 V DC battery voltage to 220 V 50 Hz AC.

The developed system was implemented at the Kherson National Technical University to illuminate the courtyard of the 1st academic building. It has been experimentally clarified that when two 30 W LED spotlights are used as lighting devices the system provides power supply from the battery during 7-8 hours reducing the electrical energy consumption from the centralized power grid.

Key words: *lighting system, energy saving, battery, centralized power grid, photovoltaic system, electromagnetic relay, photorelay, standalone inverter.*

Постановка проблеми

В умовах браку генеруючих потужностей в загальній енергосистемі України на перший план виходить питання раціонального використання наявної мережевої енергії. Досягнення максимальної ефективності заходів з енергозбереження в електроенергетичному секторі передбачає застосування комплексного підходу, пов'язаного як з використанням енергоощадного обладнання, так і з впровадженням об'єктів децентралізованої генерації на боці споживачів [1]. Введення організаційних заходів у вигляді суворих обмежень на застосування потужних електроприладів в організаціях і установах державного сектору є вимушеним кроком для забезпечення балансу між генерацією і споживанням електричної енергії та стабілізації енергосистеми.

Так, Міністерство освіти і науки України у червні 2024 року опублікувало роз'яснення щодо заощадження електричної енергії в закладах освіти [2]. Згідно цих рекомендацій в закладах, підпорядкованих Міністерству освіти і науки України, обмежується використання кондиціонерів та систем зовнішнього освітлення в тих випадках, коли це не створює загрози для учасників освітнього процесу.

Уникнути цих обмежень можливо при переході на джерела автономного електропостачання, що можуть використовувати як традиційні види палива, так і енергію відновлюваних джерел. Втім, використання відновлюваних джерел енергії, як-то енергії вітру та сонячного випромінювання, має очевидні переваги перед традиційним паливом, що пов'язано як з екологічними вигодами, так і з відсутністю витрат на закупівлю паливних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Описані в літературі стандартні схеми автономних і гібридних систем електропостачання на основі відновлюваних джерел дозволяють або повністю відмовитись від мережевої енергії, або значно скоротити її споживання [3–5]. Такі системи містять в своєму складі електрохімічний акумулятор, що є джерелом живлення споживачів на час нестачі або відсутності надходження енергії від генератора.

В автономних системах електрозабезпечення, що не мають зв'язку з централізованою мережею, потужність джерела енергії має бути достатньою для повного і безперервного покриття потреби основних споживачів в електричній енергії. У випадку використання фотоелектричного або вітроелектричного генератора така система, як правило, потребує створення значного запасу встановленої потужності, а також акумуляторної батареї великої ємності, зважаючи на періодичний та випадковий характер у надходженні енергії від відновлюваного джерела. Це значно здорожує автономну систему.

На відміну від автономних, гібридні системи електрозабезпечення мають безпосередній зв'язок з централізованою електромережею через інвертор з вбудованим контролером, що регулює потоки енергії між мережею, автономним генератором, акумуляторною батареєю та споживачем. Такий гібридний інвертор в загальному випадку може бути налаштований на пріоритет щодо вибору джерела електропостачання – від централізованої мережі, генератора або від акумуляторної батареї – у зв'язку з чим гібридна система здатна забезпечити значну економію спожитої з мережі електричної енергії. Втім, вартість гібридних інверторів є доволі високою, і розробка нових схем для економії споживаної мережевої електрики, побудованих на дешевших компонентах, є актуальною і своєчасною.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка системи зовнішнього освітлення з пріоритетним живленням від автономного джерела постійної напруги задля зменшення споживання електричної енергії від централізованої мережі.

Викладення основного матеріалу дослідження

На рис. 1 представлено блочну схему, що демонструє запропонований принцип організації системи зовнішнього освітлення з генератором на основі фотоелектричних модулів.

В світлу пору доби відбувається заряджання акумуляторної батареї А від фотоелектричного генератора Г через контролер заряду акумулятора К. При увімкненні системи зовнішнього освітлення Н в темну пору доби пріоритетним є канал живлення, що формується потоком енергії від акумуляторної батареї через контролер К та інвертор І. Канал живлення системи освітлення від централізованої мережі М є резервним і підключається у випадку зменшення напруги на акумуляторній батареї до напруги розрядженого стану. Отже, головним призначенням запропонованої схеми організації системи освітлення є зведення до мінімуму споживання електричної енергії з мережі.

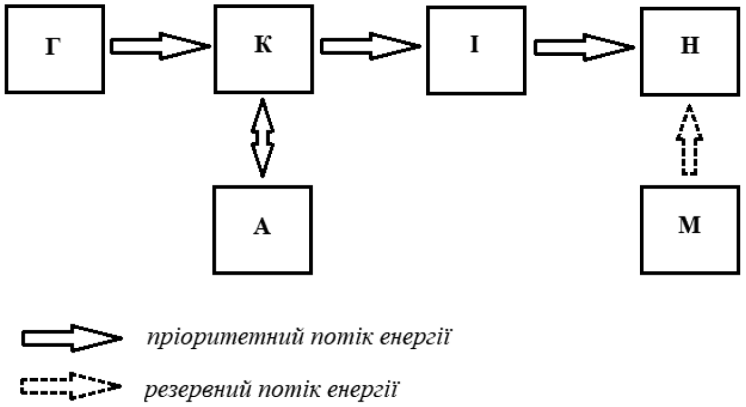


Рис. 1. Схема енергетичних потоків в розробленій системі освітлення

Електричну схему запропонованої системи зовнішнього освітлення представлено на рис. 2.

Систему побудовано на двох електромагнітних реле РК-1Р [6] та РК-2Р [7], інверторі, що перетворює постійну напругу 12 В у змінну 220 В, та фотореле ФР. Принцип її роботи полягає у наступному.

Мережева напруга через автоматичний вимикач ВА та нормально замкнені пари контактів 7–8 та 10–11 реле РК-2Р подається на фотореле ФР. При зменшенні освітленості фотодатчика реле ФР до рівня спрацювання, воно подає напругу від централізованої електромережі до прожекторів Л1 та Л2, поява якої призводить до спрацювання електромагніту реле РК-1Р і замикання його нормально розімкнутих контактів 11–12. В результаті спрацювання реле РК-1Р на інвертор подається напруга від акумуляторної батареї АКБ, інвертор запускається і на його виході з'являється змінна напруга 220 В. Поява цієї напруги на електромагніті реле РК-2Р призводить до перекомутації схеми, в результаті якої контакти 7–8 та 10–11 розмикаються, а замикаються пари контактів 8–9 та 11–12,

зовнішня мережа від'єднується від системи і прожектори починають отримувати живлення від акумулятора через інвертор. При зниженні напруги на акумуляторній батареї до рівня розрядженого стану, інвертор вимикається і система повертається до живлення від загальної електромережі.

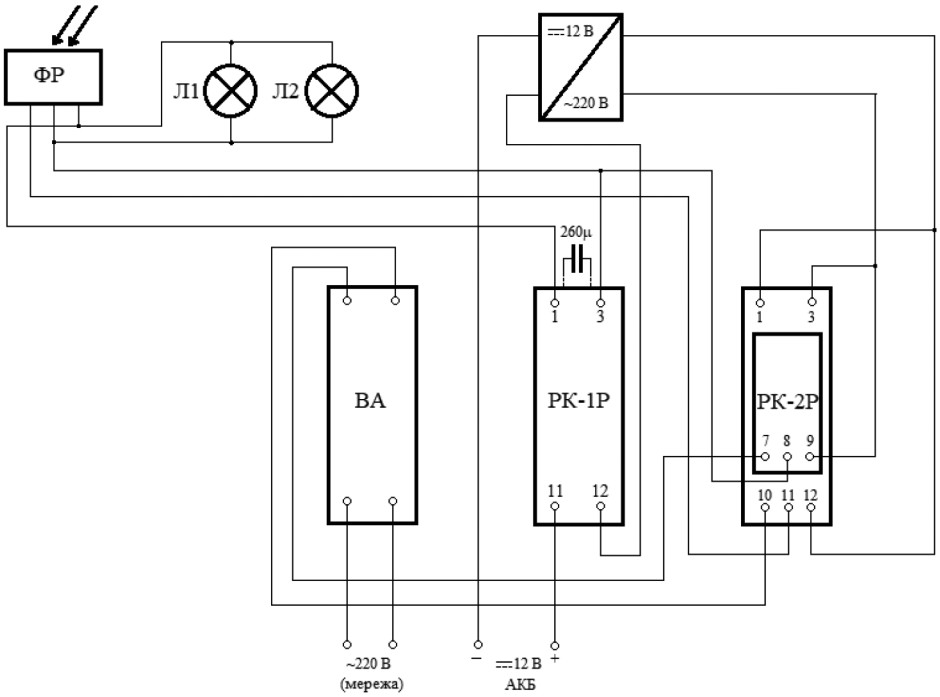


Рис. 2. Електрична схема системи зовнішнього освітлення

Оскільки час перемикання реле РК-1Р та РК-2Р є близьким і становить порядку 40 мс, то для підтримання реле РК-1Р у спрацьованому стані під час перекомутації контактів реле РК-2Р, в наслідок якої напруга на освітлювальній установці короткочасно зникає, до електромагніту реле РК-1Р підключено конденсатор ємністю 260 мкФ, заряду якого вистачає для підтримання достатнього рівня напруги на котушці протягом приблизно 1 с.

Заряджання акумуляторної батареї відбувається протягом денного періоду доби від фотоелектричної системи, що складається з фотоелектричного модуля 120Р/12 номінальною потужністю 120 Вт та ШІМ-контролера SLC NR2420A [8]. В якості електрохімічного накопичувача енергії застосовано гелеву свинцево-кислотну акумуляторну батарею Kijo JDG 12V 65Ah GEL ємністю 65 А·год, що допускає глибоке розряджання [9].



Рис. 3. Система вуличного освітлення внутрішнього подвір'я ХНТУ з пріоритетним живленням від джерела постійної напруги

Перетворення постійної напруги акумуляторної батареї в змінну 220 В з частотою 50 Гц здійснюється автономним інвертором KONNWEI 2000W [10].

На рис. 3 представлено реалізацію розробленої схеми в якості системи освітлення внутрішнього подвір'я І корпусу Херсонського національного технічного університету (ХНТУ). В освітлювальній установці використовувались два світлодіодних прожектори зі споживаною потужністю 30 Вт кожен.

Досвід експлуатації розробленої системи освітлення подвір'я в період з 10 грудня 2021 року по 24 лютого 2022 року продемонстрував здатність забезпечувати безперервне живлення освітлювальної установки від акумуляторної батареї протягом 7–8 годин, що становить близько половини тривалості темного періоду доби в день зимового сонцестояння.

Висновки

Розроблено систему зовнішнього освітлення з пріоритетним живленням від джерела постійної напруги, в якості якого використовується електрохімічний накопичувач енергії, що заряджається в денний період доби від автономної фотоелектричної станції. Доведено працездатність розробленої схеми шляхом її реалізації в системі освітлення внутрішнього подвір'я І корпусу ХНТУ. Досвід експлуатації системи продемонстрував здатність забезпечувати живлення освітлювальної установки від автономного джерела енергії протягом 7–8 годин, що свідчить про доцільність застосування таких систем для зменшення споживання електричної енергії з централізованої мережі.

Список використаної літератури

1. Прем'єр-міністр закликав українців до заощадження електроенергії [Електронний ресурс]. Урядовий портал [Сайт]. Режим доступу: https://www.kmu.gov.ua/news/premier-ministr-zaklykav-ukraintsiv-do-zaoshchadzhennia-elektroenerhii-usi-razom-maiemo-dopomohty-enerhetytsi-vystoiaty (дата звернення 15.05.25). Назва з екрану.

2. Заощадження електроенергії в закладах освіти: додаткові роз'яснення [Електронний ресурс]. Міністерство освіти і науки України [Сайт]. Режим доступу: https://mon.gov.ua/news/zaoshchadzhennia-elektroenerhii-v-zakladakh-osvity-dodatkovi-roziasnennia (дата звернення 15.05.25). Назва з екрану.

3. Казіміров О. О., Власов К. В., Куртов А. І., Потіхенський А. І. Дослідження можливостей використання сонячної енергії для автономного живлення об'єкту. *Системи обробки інформації*. Вип. 1(147). 2017. С. 58–61. DOI: 10.30748/soi.2017.147.11

4. Дурас М. В. Типи автономних джерел електричної енергії України та способи їх підключення до споживачів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Том 29(68). Ч. 2. № 4. 2018. С. 36–40.

5. Костинчук О. В., Зима І. В. Властивості автономного джерела живлення як об'єкта керування потужністю. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Том 35(74). № 1. 2024. С. 163–168. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.1/25

6. Допоміжне реле F&F PK-1P-230V [Електронний ресурс]. Axiomplus [Сайт]. Режим доступу: https://axiomplus.com.ua/ua/ vspomogatelnye-rele/product-35037/ (дата звернення: 30.04.2025). Назва з екрану.

7. Електромагнітне реле PK-2P-230V [Електронний ресурс]. Електросвіт [Сайт]. Режим доступу: https://es.ua/668-pk-2p-230v (дата звернення: 1.05.2025). Назва з екрану.

8. SOLARLAND 20A Solar Charge Controller SLC NR2420A [Electronic resource]. eMarine Systems [Site]. Access mode: https://www.emarineinc.com/SOLARLAND-20A-Solar-Charge-Controller-SLC-NR2420A (last access: 15.05.2025). Title from the screen.

9. Акумуляторна батарея Kijo JDG 12V 65Ah GEL [Електронний ресурс]. Alfa Solar [Сайт]. Режим доступу: https://alfa.solar/uk/akumulyatorna-batareya-kijo-jdg-12v-65ah-gel-id545.html (дата звернення: 1.05.2025). Назва з екрану.

10. Перетворювач Konnwei 2000w 12v [Електронний ресурс]. TopTech [Сайт]. Режим доступу: https://toptech.com.ua/ua/p2013972924-preobrazovatel-konnwei-2000w.html (дата звернення: 1.05.2025). Назва з екрану.

References

1. Prime Minister called on Ukrainians to save electricity [Electronic resource]. Government portal [Site]. Access mode: https://www.kmu.gov.ua/news/premier-ministr-zaklykav-ukraintsiv-do-zaoshchadzhennia-elektroenerhii-usi-razom-maiemo-dopomohty-enerhetytsi-vystoiaty (last access: 15.05.25). Title from the screen.

2. Zaoshchadzhennya elektroenerhiyi v zakladakh osvity: dodatkovi roz″yasnennya [Saving electricity in educational institutions: additional clarifications] [Electronic resource]. Ministry of Education and Science of Ukraine [Site]. Access mode: https://mon.gov.ua/news/zaoshchadzhennia-elektroenerhii-v-zakladakh-osvity-dodatkovi-roziasnennia (last access: 15.05.25). Title from the screen.

3. Kazimirov O. O., Vlasov K. V., Kurtov A. I., Potixensky A. I. (2017) Doslidzhennya mozhlyvostey vykorystannya sonyachnoyi enerhiyi dlya avtonomnoho zhyvlennya ob'yektu. [Study the possibility of using solar energy for autonomous power supply facility]. *Systemy obrobky informatsiyi*, issue 1(147), pp. 58–61. DOI: 10.30748/soi.2017.147.11

4. Duras M.V. (2018) Typy avtonomnykh dzherel elektrychnoyi enerhiyi Ukrayiny ta sposoby yikh pidklyuchennya do spozhyvachiv [Types of Ukrainian autonomous electric energy sources and how to connect them to consumers]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernads'koho. Seriya: tekhnichni nauky*, vol. 29(68), part 2, no. 4, pp. 36–40.

5. Kostynchuk O. V., Zyma I. V. (2024) Vlastyvosti avtonomnoho dzherela zhyvlennya yak ob'yekta keruvannya potuzhnistyu [Properties of an autonomous power supply as a power control object]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernads'koho. Seriya: tekhnichni nauky*, vol. 35(74), no. 1, pp. 163–168. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.1/25

6. Auxiliary relay F&F PK-1P-230V [Electronic resource]. Axiomplus [Site]. Access mode: https://axiomplus.com.ua/ua/ vspomogatelnye-rele/product-35037/ (last access: 30.04.2025). Title from the screen.

7. Electromagnetic relay PK-2P-230V [Electronic resource]. Electrosvit [Site]. Access mode: https://es.ua/668-pk-2p-230v (last access: 1.05.2025). Title from the screen.

8. SOLARLAND 20A Solar Charge Controller SLC NR2420A [Electronic resource]. eMarine Systems [Site]. Access mode: https://www.emarineinc.com/SOLARLAND-20A-Solar-Charge-Controller-SLC-NR2420A (last access: 15.05.2025). Title from the screen.

9. Rechargeable battery Kijo JDG 12V 65Ah GEL [Electronic resource]. Alfa Solar [Site]. Access mode: https://alfa.solar/uk/akumulyatorna-batareya-kijo-jdg-12v-65ah-gel-id545.html (last access: 1.05.2025). Title from the screen.

10. Invertor Konnwei 2000w 12v [Electronic resource]. TopTech [Site]. Access mode: https://toptech.com.ua/ua/p2013972924-preobrazovatel-konnwei-2000w.html (last access: 1.05.2025). Title from the screen.

УДК 66.081.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.15

М. С. КУЧУК
аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0007-7969-316X

О. Р. БЄЛЯНСЬКА
кандидат технічних наук з технології неорганічних речовин, доцент,
викладач загальних природничих дисциплін
Кам'янське вище професійне училище
ORCID: 0000-0001-8026-8004

О. В. КРАВЧЕНКО
доктор технічних наук з технології неорганічних речовин, професор,
професор кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0006-8833-3441

О. І. ОНОПРІЄНКО
здобувач бакалаврського рівня
кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0007-5631-0218

Л. В. ВАЩЕНКО
завідувач лабораторії кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0006-6464-2784

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ЗАБАРВЛЕНИХ РОЗЧИНІВ ПРИ АКТИВУВАННІ ДИСПЕРГУВАННЯМ КИСЕНЬ-ВОДНЕВИХ ПРОЦЕСІВ ІЗ НАСТУПНОЮ АДСОРБЦІЄЮ

У статті досліджено вплив попередньої механічної обробки забарвленого розчину на ефективність адсорбційного очищення від органічних барвників, зокрема метилоранжу та брильянтового зеленого. Як адсорбенти використовували силікагель і активоване вугілля. Основною метою дослідження було встановлення ефективності різних режимів перемішування розчину перед адсорбцією та їх впливу на подальше знебарвлення. Для механічної обробки застосовували фрезерну та рамну мішалки з частотами обертання 30 і 60 об/хв. Проведено серію експериментів із вимірювання зміни кольоровості розчину протягом 80 хвилин після обробки та подальшого очищення. Встановлено, що попереднє перемішування суттєво підвищує ефективність адсорбції порівняно з необробленим зразком: при відсутності обробки кінцева забарвленість становила 45°, тоді як після фрезерного перемішування з частотою 60 об/хв – лише 15°, без утворення каламутності. Найбільш ефективним виявилось перемішування фрезерною мішалкою перед адсорбцією на силікагелі: забарвленість знижувалась до 10–15° за 80 хвилин. Навіть при 30 об/хв вона демонструвала ефективність до 20°. Рамна мішалка показала гірші результати (35–38°), проте забезпечувала стабільність, що важливо при роботі з активованим вугіллям. Застосування фрезерної мішалки з вугіллям призводило до утворення високодисперсної суспензії, яка ускладнює пробовідбір і подальший аналіз. Таким чином, визначено оптимальні режими попередньої механічної обробки: для силікагелю – фрезерна мішалка, 60 об/хв; для активованого вугілля – рамна мішалка, 60 об/хв. Установлено, що застосування адсорбційного доочищення після попередньої обробки дозволяє досягти значного зниження залишкової концентрації барвника. Адсорбційна ємність активованого вугілля після механічної активації та окиснення зростає в 1,3–1,6 раза залежно від типу барвника. Отримані результати мають високу практичну значущість для вдосконалення технологій очищення стічних вод, зокрема у галузях, що пов'язані з використанням органічних барвників – текстильній, шкіряній, целюлозно-паперовій та харчовій промисловості. Запропонована комбінація методів є енергоефективною, не потребує значної кількості хімічних реагентів, знижує обсяг утворення шламів і дозволяє адаптувати процес до існуючих очисних споруд.

Ключові слова: *диспергування, водний розчин, кисень-водневий процес, адсорбція, силікагель, активоване вугілля.*

M. S. KUCHUK
Postgraduate Student at the Department of Chemical
and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0009-0007-7969-316X

O. R. BYELYANSKA
PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Lecturer in General Natural Sciences
Kamianske Higher Vocational School
ORCID: 0000-0001-8026-8004

O. V. KRAVCHENKO
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Chemical
and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0009-0006-8833-3441

O. I. ONOPRIIENKO
Bachelor's Degree Candidate at the Department of Chemical
and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0009-0007-5631-0218

L. V. VASHCHENKO
Laboratory Head at the Department of Chemical
and Biological Technologies
Dnipro State Technical University
ORCID: 0009-0006-6464-2784

STUDY OF THE TECHNOLOGY FOR COLORED SOLUTIONS PURIFICATION THROUGH DISPERSION-ACTIVATED OXYGEN-HYDROGEN PROCESSES FOLLOWED BY ADSORPTION

The article investigates the effect of preliminary mechanical treatment of a colored solution on the efficiency of adsorption purification from organic dyes, specifically methyl orange and brilliant green. Silica gel and activated carbon were used as adsorbents. The main aim of the study was to determine the effectiveness of different mixing modes prior to adsorption and their impact on subsequent decolorization. For mechanical treatment, milling and frame stirrers were used at rotation speeds of 30 and 60 rpm. A series of experiments was conducted to measure the color change of the solution over 80 minutes following treatment and subsequent purification. It was found that pre-mixing significantly increases adsorption efficiency compared to untreated samples: without treatment, the final color intensity was 45°, while after milling at 60 rpm, it decreased to only 15°, with no turbidity formation. The most effective approach was mixing with a milling stirrer before adsorption on silica gel: color intensity decreased to 10–15° after 80 minutes. Even at 30 rpm, it showed efficiency down to 20°. The frame stirrer showed worse results (35–38°) but provided better stability, which is important when working with activated carbon. Using a milling stirrer with carbon led to the formation of a fine suspension, complicating sampling and further analysis. Thus, optimal pre-treatment modes were identified: for silica gel – milling stirrer at 60 rpm; for activated carbon – frame stirrer at 60 rpm. It was established that applying adsorption post-treatment after preliminary mechanical activation allows a significant reduction in the residual dye concentration. The adsorption capacity of activated carbon after mechanical activation and oxidation increased by 1.3–1.6 times, depending on the dye type. The obtained results have high practical relevance for improving wastewater treatment technologies, particularly in industries using organic dyes – textile, leather, pulp and paper, and food industries. The proposed combination of methods is energy-efficient, requires minimal chemical reagents, reduces sludge formation, and can be integrated into existing treatment facilities. This ensures the economic feasibility of implementing the developed technology in both centralized and local industrial wastewater treatment systems.

Key words: *dispersion, aqueous solution, oxygen-hydrogen process, adsorption, silica gel, activated carbon.*

Постановка проблеми

В умовах сучасних екологічних викликів та збройної агресії проти України проблема забезпечення населення якісною питною водою набула особливої актуальності [1]. Військові дії призводять до пошкодження та руйнування об'єктів цивільної інфраструктури, зокрема систем централізованого водопостачання та очисних споруд [2]. Це спричиняє підвищений ризик забруднення водних джерел органічними сполуками, у тому числі барвниками,

що можуть потрапляти у воду внаслідок руйнування промислових підприємств, логістичних складів, військової техніки, а також медичних і побутових засобів.

Традиційні методи адсорбційного очищення хоч і є ефективними [3], проте часто характеризуються тривалим часом обробки та зниженою ефективністю при високому навантаженні на систему. В умовах обмежених ресурсів, перебоїв з електро- та водопостачанням, необхідність швидкої, ефективної та доступної очистки води стає критично важливою.

З огляду на це постає завдання удосконалення процесів адсорбційного очищення шляхом попередньої механічної активації забарвлених розчинів, зокрема через диспергування. Такий підхід дозволяє інтенсифікувати кисень-водневі процеси, покращити контакт між забруднювачем і поверхнею адсорбенту, та підвищити ефективність очищення. Особливу цінність такі методи мають для створення компактних систем очищення, які можуть бути оперативно застосовані в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема на прифронтових територіях та в зонах гуманітарної кризи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодні очищення стічних вод є однією з найважливіших екологічних проблем у світі. Значну загрозу становлять органічні барвники, які потрапляють у водойми переважно з неочищеними промисловими стоками. Вони підвищують рівень ХПК і БПК, змінюють колір води, ускладнюючи її подальше очищення та знижуючи екологічну якість [4].

Серед різних методів розділення речовин адсорбція вирізняється своєю доступністю, простотою та ефективністю у масштабних водоочисних процесах. Упродовж 2020 року було запропоновано багато нових адсорбентів для видалення барвників, але більшість досліджень мають суттєві недоліки:

1. Непорівнянність результатів. Показники адсорбційної здатності сильно варіюються, що ускладнює об'єктивне оцінювання ефективності запропонованих матеріалів.
2. Ігнорування етапу десорбції. Майже половина досліджень не охоплює повний цикл адсорбція-десорбція, а в тих, де десорбцію розглянуто, часто відсутня інформація про подальшу утилізацію забрудненого десорбційного розчину.
3. Брак аналізу технологічних параметрів. У більшості робіт не досліджуються важливі змінні, як-от швидкість та спосіб перемішування, які істотно впливають на ефективність адсорбційного процесу [4].

Особливу увагу заслуговують нові, альтернативні адсорбенти, зокрема відходи металургійного виробництва. Перспективним прикладом є використання кислотно-обробленого шлаку киснево-конвертерного виробництва (BOF-шлаку) для видалення синтетичних текстильних барвників (Reactive Blue 19, Reactive Black 5, Reactive Red 120). Дослідження показали, що при pH 2,0 BOF-шлак демонструє високу адсорбційну здатність – до 76 мг/г для RB5. Отримані результати добре описуються ізотермами Ленгмюра та Редліха-Петерсона, а кінетика процесу відповідає моделі псевдопершого порядку [5].

У пошуках більш сталих та екологічно безпечних рішень для очищення стічних вод все більше уваги приділяється природним біосорбентам [6]. Одним із перспективних підходів є використання агровідходів, які не лише є доступними, але й екологічно дружніми. У цьому контексті ця робота досліджує потенціал шкірки граната як зеленого адсорбенту для видалення шкідливих барвників, зокрема метиленового синього (МС), що є типовим забруднювачем у текстильних та фармацевтичних стоках. Основні результати продемонстрували, що гранатова шкірка найбільш ефективно видаляє МС при нейтральних і лужних значеннях pH. Аналіз ізотерм рівноваги та кінетики показав, що модель псевдо-другого порядку найкраще описує процес адсорбції, а рівноважні дані найточніше узгоджуються з моделлю Редліха-Петерсона [6].

Окрім очищення водних середовищ від органічних забруднювачів, адсорбційні технології набувають усе більшого значення в системах регенерації вологи та низькопотенційного тепла. У цьому напрямі було досліджено експлуатаційні параметри адсорбційного регенератора тепла та вологи, створеного на основі композитів «силікагель – натрій сульфат» та «силікагель – натрій ацетат», отриманих золь-гель методом. Такі матеріали поєднують високу адсорбційну здатність силікагелю з термохімічними властивостями солей, забезпечуючи ефективне накопичення та регенерацію вологи й тепла [7-8].

У ході дослідження було встановлено кореляцію між температурним коефіцієнтом корисної дії (ТККД) та такими параметрами, як швидкість повітряного потоку, час перемикання потоків, а також температури внутрішнього та зовнішнього повітря. Зокрема, максимальна ефективність спостерігалася при швидкості повітря 0,22–0,32 м/с та часі перемикання 5–10 хвилин для композиту «силікагель – натрій сульфат» [7-8]. Таким чином, поєднання екологічних та технічних адсорбентів у багатофункціональних системах – від очищення води до утилізації тепла – відкриває широкі перспективи для розвитку адаптивних, ресурсоощадних технологій в умовах як мирного часу, так і надзвичайних ситуацій.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи було дослідження нової технології очищення забарвлених розчинів при активуванні диспергуванням системи фарбник – розчинник, а саме кисень-водневих процесів із наступною адсорбцією на силікагелі і активованому вугіллі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом дослідження є модельний водний розчин, забарвлений метилоранжем, який піддається попередній механічній активації шляхом перемішування рамною та фрезерною мішалками, з подальшим очищенням шляхом адсорбції на активованому вугіллі та силікагелі.

Передбачалось, що попередня активація кисень-водневих процесів забарвлених модельних розчинів сприяє підвищенню ефективності адсорбційного очищення забарвленого розчину на твердому сорбенті – силікагелі, активованому вугіллі.

У дослідженні для визначення кольоровості води застосовано фотоколориметричний метод. Статистичний аналіз та обробка отриманих експериментальних даних і результатів вимірювань були виконані за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel.

У рамках розширення функціональності адсорбентів для різних технологічних застосувань, зокрема в енергетичних системах, вченими було досліджено вплив кисневих функціональних груп та наявності води на процес адсорбції водню через механізм перетікання водню (hydrogen spillover). Для модифікації активованого вугілля (АВ), яке виступає вторинним акцептором водню після фізичного контакту з платиновим (Pt-) каталізатором, застосовано хімічну обробку гідроксидом калію (KOH) з метою підвищення концентрації кисневих поверхневих груп [9].

Результати рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS) підтвердили збільшення атомної частки кисню та зростання вмісту функціональних груп карбонільного і хінонового типу. Такі зміни забезпечують ефективніше захоплення та перенесення водню, що особливо помітно за низького тиску (< 100 мбар). Зокрема, при температурі 300 К було зафіксовано поглинання водню на рівні 1,1 мас.% при 100 мбар, яке зростає до 1,4 мас.% при 20 бар, хоча лише 0,4 мас.% водню десорбується при нормальних умовах шляхом зниження тиску [9].

Ці результати свідчать про критичну роль слідових кількостей води, присутніх під час активації адсорбенту, у формуванні активних центрів, що відповідають за ефективне перетікання водню. Це підтверджується додатковим спектроскопічним аналізом за допомогою FTIR та XPS, які демонструють структурні зміни на поверхні після обробки [9]. Крім того, така стратегія функціоналізації активованого вугілля може бути адаптована для суміщення сорбційної здатності з каталізом у складних середовищах, зокрема у сфері водневої енергетики [9].

Під час адсорбції метилоранжу силікагелем та активованим вугіллям відбуваються кисень-водневі процеси. Адсорбція фарбників – це процес, у якому молекули барвника зв'язуються з поверхнею адсорбенту (в нашому випадку, силікагелю або активованого вугілля). При цьому можуть відбуватися окисно-відновні реакції, де ключову роль відіграють кисень і водень як активні компоненти середовища або функціональні групи на поверхні адсорбентів. Це пояснюється тим, що на поверхні активованого вугілля або силікагелю можуть бути функціональні групи, які взаємодіють з киснем, це є реакції типу окиснення – наприклад, розрив подвійних зв'язків у структурі метилоранжу.

У присутності водню можлива редукція барвника або модифікація активних центрів адсорбенту, що підвищує його здатність до утримання молекул. Крім того, активоване вугілля саме по собі має розвинену пористу структуру та функціональні групи (наприклад, гідроксильні, карбонільні), які можуть каталізувати кисень-водневі реакції. Водночас, силікагель має менш виражені редокс-властивості, проте добре утримує полярні молекули за рахунок водневих зв'язків та сил Ван дер Ваальса.

Тобто очікувалось, що фрезерна (диспергувальна) мішалка забезпечить інтенсивне перемішування, створюючи турбулентність для покращення масообміну, диспергування великих молекул або агломератів барвника на дрібніші частинки для кращої адсорбції, а також насичення рідини киснем із повітря (аерацію). Практичне значення дослідження полягає в тому, що у фармацевтичній, текстильній та екологічній галузях адсорбція барвників із залученням кисню-водню має значення для очищення стічних вод, каталізу та створення сорбентів з контрольованими властивостями. Вивчення цих процесів допомагає вдосконалити очисні фільтри, сенсори та каталітичні системи.

Методика експерименту. У перші чотири 100-мл циліндри помістили силікагель (20,4 г, 10 мл), а в інші чотири – активоване вугілля (9,3 г, 10 мл). У перші циліндри з кожним адсорбентом додали забруднену воду без попереднього перемішування. Забруднювачі: брильянтовий зелений та метилоранж. У наступні три циліндри наливали воду, попередньо перемішану при частоті 30 об/хв протягом 0,3 хв, 60 об/хв протягом 0,3 хв. Проби для визначення кольоровості розчину фотоколориметричним методом відбирали через 0, 20, 40, 60 та 80 хвилин адсорбції.

Якісний аналіз очищення забарвленого розчину метилоранжем із використанням активованого вугілля і силікагелю представлено на рис. 1.

Згідно рис. 1, очевидним є те, що циліндри із активованим вугіллям зліва мають світлішу воду, ніж останні два справа. Незважаючи на очікувану ефективність активованого вугілля як сорбенту, попереднє турбоперемішування (швидкість обертання ротора фрезерної мішалки 60 об/хв) призвело до збереження каламутності забарвленого розчину. Це може бути зумовлено надмірною турбулентністю, що перешкоджає фіксації барвника на сорбенті, а також інтенсивним диспергуванням часток вугілля до колоїдного стану. Крім того, кавітаційні ефекти могли викликати часткове руйнування барвника, утворення продуктів, які залишаються у зваженому стані й зберігають мутність розчину.

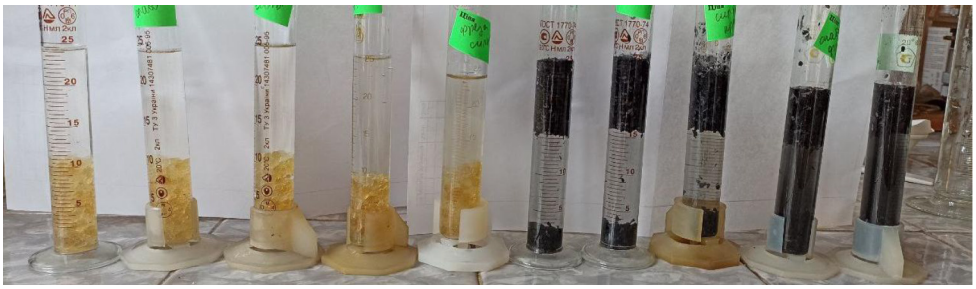


Рис. 1. Якісний аналіз очищення модельної забарвленої метилоранжем води після попередньої механічної обробки розчину

Так, через добу каламутність розчину, що очищували із використанням активованого вугілля зберігалась (рис. 2).



а)Через 80 хвилин б) Через добу

Рис. 2. Результати якісного аналізу попереднього диспергування забарвленого розчину метилоранжем і подальшого очищення активованим вугіллям

Видно, що при попередньому турбоперемішуванні розчин залишився каламутним, незважаючи на використання активованого вугілля, яке зазвичай добре адсорбує барвники.

Наочне порівняння проводили за допомогою використання другого барвника – брильянтового зеленого при використанні попередньої методики експерименту. За допомогою якісного аналізу встановили якість попередньої обробки перемішуючими приладами забарвлених розчинів брильянтовим зеленим – рис. 3.

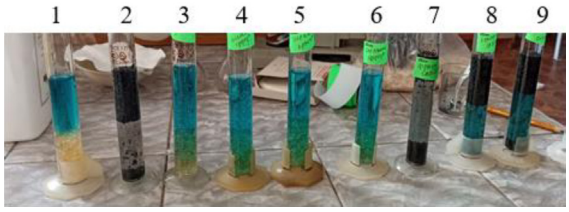


Рис. 3. Якісний аналіз очищення модельної забарвленої брильянтовим зеленим води після попередньої механічної обробки розчину: 1, 2 – Без механічної обробки; 3, 7 – Попередньо перемішаний розчин рамною мішалкою 30 об/хв; 4, 8 – Попередньо перемішаний розчин фрезерною мішалкою 30 об/хв; 5, 9 – Попередньо перемішаний розчин рамною мішалкою 60 об/хв; 6 – Попередньо перемішаний розчин фрезерною мішалкою 60 об/хв

Якісний аналіз попереднього диспергування, механічної обробки рамною мішалкою забарвленого розчину і подальшого очищення активованим вугіллям і силікагелем підтверджують і повторюють результати експерименту із метилоранжем. У першому циліндрі видно, як зафарбований розчин повільно очищується на адсорбентах і 80 хвилин експерименту не є достатнім для освітлення розчину, до того ж сам силікагель (циліндр 1) через 80 хв не мав кольору, тобто очищення проходило з малою ефективністю. Видно, що при використанні рамної мішалки, активоване вугілля якісніше змішується із розчином, не утворюючи каламутної звисі.

На рис. 4 представлено кількісний аналіз вищенаведеного досліду із метилоранжем у розчині при використанні активованого вугілля.

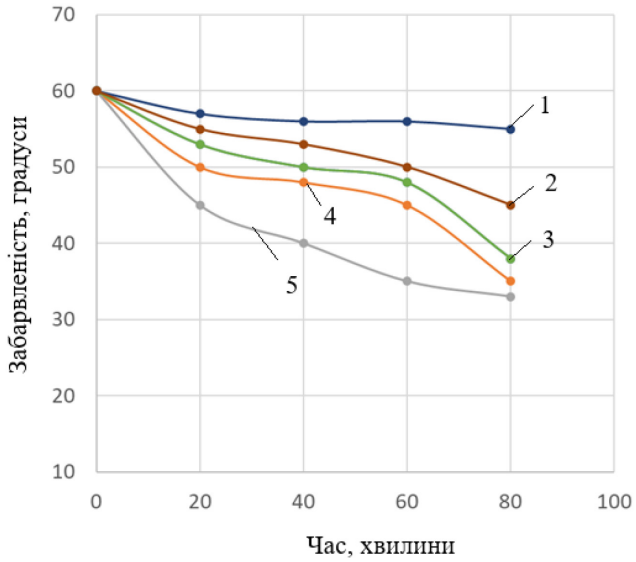


Рис. 4. Залежність зміни забарвленості розчину від часу адсорбції при використанні у якості адсорбенту активованого вугілля при попередній обробці рамною і фрезерною мішалкою на різних частотах: 1 – обробка розчину в турборежимі фрезою (60 об/хв); 2 – контрольна проба без попередньої обробки; 3 – попередня обробка рамною мішалкою (30 об/хв); 4 – попередня обробка (60 об/хв) рамною мішалкою; 5 – попередня обробка фрезерною мішалкою (30 об/хв)

Дослідження показали, що попереднє перемішування розчину рамною мішалкою перед адсорбцією на активованому вугіллі є доцільним з огляду на ефективність зниження забарвленості води та забезпечення стабільності процесу. Зокрема, при попередньому перемішуванні рамною мішалкою зі частотою 30 об/хв забарвленість зменшувалась з 60° до 38°, а при 60 об/хв – до 35°. У випадку, коли попереднє перемішування не проводилось, забарвленість після адсорбції становила 45°. Для порівняння, при використанні фрезової мішалки на частоті 30 об/хв забарвленість знижувалась до 32°, однак при збільшенні частоти до 60 об/хв спостерігалось утворення висококаламутної суспензії адсорбенту, яка стабілізувалась лише через добу. Таким чином, попереднє перемішування розчину рамною мішалкою забезпечує оптимальні умови для подальшої адсорбції на активованому вугіллі, що

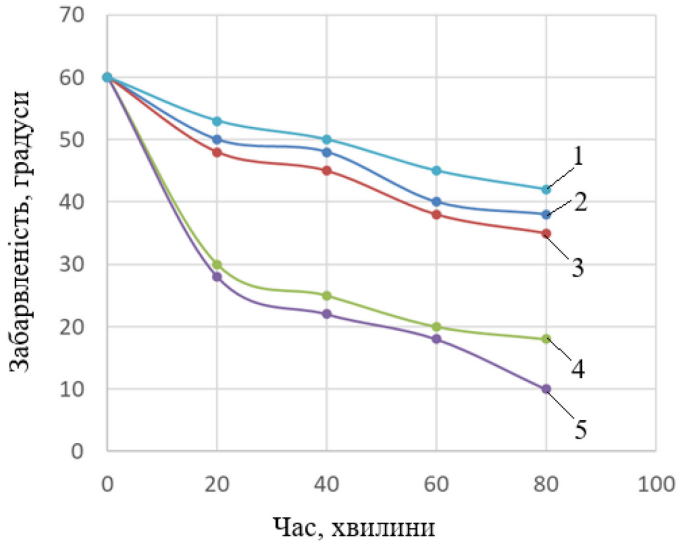


Рис. 5. Залежність зміни забарвленості розчину від часу адсорбції при використанні у якості адсорбенту силікагелю при попередній обробці рамною і фрезерною мішалкою на різних частотах: 1 – контрольна проба без попередньої обробки; 2 – попередня обробка на частоті 30 об/хв рамною мішалкою; 3 – попередня обробка на частоті 60 об/хв рамною мішалкою; 4 – попередня обробка на частоті 30 об/хв фрезерною мішалкою; 5 – попередня обробка забарвленого розчину на частоті 60 об/хв фрезерною мішалкою

робить її найбільш доцільним технічним рішенням для цього етапу процесу. На рисунку 5 наведено результати попередньої механічної обробки забарвлених розчинів при подальшій адсорбції фарбника на силікагелі.

Попереднє перемішування розчину перед адсорбцією на силікагелі значно покращує ефективність знебарвлення, порівняно з контрольним зразком без обробки, у якому забарвленість знижувалася лише до 45°. Найвищу ефективність адсорбції досягнуто при попередньому перемішуванні фрезерною мішалкою з частотою 60 об/хв – забарвленість зменшувалась до 15°, що є найкращим результатом серед усіх досліджених умов.

На відміну від активованого вугілля, силікагель не утворює надмірно диспергованої або каламутної суспензії при високочастотній фрезерній обробці, що дозволяє ефективно використовувати цей режим без ускладнень, пов'язаних із фазовою нестабільністю. Перемішування фрезерною мішалкою на 30 об/хв також забезпечує високу ефективність – кінцева забарвленість становила 20°, що є значно нижчим за показники рамної мішалки.

Рамна мішалка, хоча й забезпечує кращі результати, ніж контрольна проба (до 38° при 30 об/хв і до 35° при 60 об/хв), поступається фрезерній за ефективністю знебарвлення, що свідчить про обмежене перемішування у цьому режимі. Таким чином, оптимальним режимом попередньої обробки при адсорбції на силікагелі є фрезерне перемішування з частотою 60 об/хв, яке забезпечує максимальну адсорбційну ефективність без негативного впливу на стабільність системи.

Вищенаведені результати пояснюються також і кисень-водневими процесами при попередній обробці забарвленої рідини фрезерною мішалкою для подальшої адсорбції. Фрезерна (диспергувальна) мішалка забезпечує інтенсивне перемішування та турбулентність, що покращує масообмін; диспергування великих молекул або агломератів барвника до дрібніших форм, які краще адсорбуються, та аерацію – насичення рідини киснем із повітря.

Під час перемішування кисень активно залучається у часткове окиснення барвника (відбувається розрив ароматичних зв'язків, декольоризація, зміна структури). До того, висока турбулентність сприяє розчиненню молекулярного кисню, що запускає окисно-деструктивні процеси в органічних барвниках. Окиснені барвники краще взаємодіють із сорбентами через утворення нових полярних груп. Водневі зв'язки, що утворюються в процесі, впливають на міцність зв'язування барвника з поверхнею сорбенту (активоване вугілля, силікагель тощо).

Після попередньої обробки фрезерною мішалкою змінюється розмір часток, заряд та структура молекул барвника. Активована поверхня стає більш хімічно чутливою до сорбентів, адже барвник частково окиснений і має підвищену реакційну здатність, покращується доступність активних центрів адсорбентів, особливо у випадку з пористими матеріалами.

В умовах присутності кисню і води метилоранж на поверхні активованого вугілля зазнає часткового окиснення і руйнування структури, що сприяє зменшенню інтенсивності його забарвлення та покращенню адсорбції. Натомість силікагель, який не проявляє редокс-активності, сорбує метилоранж переважно завдяки утворенню водневих зв'язків між його сульфонатними групами та гідроксильними групами на поверхні сорбенту, при цьому молекули барвника зберігають свою хімічну структуру.

Висновки

1. Попередня обробка забарвленої рідини за допомогою фрезерної мішалки активізує кисень-водневі процеси, зокрема часткове окиснення молекул барвника, їх диспергування та модифікацію хімічної структури. Це суттєво підвищує ефективність подальшої адсорбції на силікагелі завдяки покращеному масообміну, підвищенню полярності молекул і створенню умов для утворення водневих зв'язків із сорбентами. Водночас, якщо адсорбція буде проходити при використанні активованого вугілля, доцільніше використовувати попереднє перемішування забарвленого розчину рамною мішалкою, задля уникнення каламутної звисі.

2. Попереднє перемішування розчину перед адсорбцією значно підвищує ефективність знебарвлення, порівняно з необробленим зразком (кінцева забарвленість – 45°). Для адсорбції на силікагелі найкращі результати досягнуті при перемішуванні фрезерною мішалкою з частотою 60 об/хв – забарвленість знижувалась до 15°, без утворення каламутної суспензії. Фрезерна мішалка на 30 об/хв також демонструє високу ефективність при адсорбції на силікагелі – забарвленість зменшувалась до 20°. Рамна мішалка менш ефективна (38° при 30 об/хв, 35° при 60 об/хв), але забезпечує стабільність і доцільна при використанні активованого вугілля як адсорбенту. Оптимальні режими попередньої обробки: для силікагелю – фрезерна мішалка, 60 об/хв; для активованого вугілля – рамна мішалка, 60 об/хв.

Список використаної літератури

1. Бондар О. І., Закорчевна Н. Б., Цвєткова А. М. Проблеми водозабезпечення населення питною водою у зв'язку із поглибленням дефіциту доступних водних ресурсів. / Науково-практичний журнал Екологічні науки №7(34). 2023. С. 134–144. http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/7/25.pdf. DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.23

2. Строкаль В. П., Ковпак А. В. Воєнні конфлікти та вода: наслідки й ризики. / Екологічні науки № 5(44). С. 94–102. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14

3. Шмичкова О., Проценко В., Величко О. Очищення стічних вод від фармацевтичних препаратів: огляд літератури. / Питання хімії і хімічної технології. 2021. № 3. С. 4–31. DOI: http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2021-136-3-4-31

4. Francisco Jose Alguacil and Felix A. Lopez Adsorption Processes in the Removal of Organic Dyes from Wastewaters: Very Recent Developments. / Selection of our books indexed in the Book Citation Index in Web of Science™ Core Collection (BKCI). 2021. P. 1–11. https://scispace.com/pdf/adsorption-processes-in-the-removal-of-organic-dyes-from-1sjhg5wda9.pdf. DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94164

5. Yongjie Xue, Haobo Hou, Shujing Zhu Adsorption removal of reactive dyes from aqueous solution by modified basic oxygen furnace slag: Isotherm and kinetic study./ Chemical Engineering Journal. 2009. № 147(2–3). P. 272–279. DOI:10.1016/j.cej.2008.07.017

6. Ghibate R., Chrachmy M., Alaqarbeh M., Ansari A., Baaziz Ben M., Bouachrine M., Taouil R., Senhaji O. Comprehensive analysis of hazardous dye adsorption onto a green adsorbent: Experimental profiling, theoretical modeling, and deciphering potential molecular interactions. / Desalination and Water Treatment. 2025. № 321. P. 100998. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.100998

7. Meyer F., Eigenbrod C., Wagner V. Apparatus to investigate liquid oxygen droplet combustion in hydrogen under microgravity conditions. 2020. № 91(10). P. 105110. DOI:10.1063/5.0020988

8. Belyanovskaya E. A., Lytovchenko R. D., Sukhyy K. M.., Yeremin O. O., Sukha I. V., Prokopenko E. M. Operating regime of adsorptive heat-moisture regenerators based on composites “silica gel – sodium sulphate” and “silica gel – sodium acetate”./ Journal of Chemistry and Technologies. 2019. № 27(2). P. 158–168. http://chemistry.dnu.dp.ua. DOI: https://doi.org/10.15421/081917

9. Li Q. X., Lueking A.D., Effect of Surface Oxygen Groups and Water on Hydrogen Spillover in Pt-Doped Activated Carbon. / The Journal of Physical Chemistry. 2011. № 115(10). P. 4273–4282. DOI:10.1021/jp105923a.

References

1. Bondar, O. I., Zakorchevna, N. B., & Tsvyetkova, A. M. (2023). Problemy vodozabezpechennya naselennya pytnoyu vodoyu u zv’yazku iz poglyblennyam defitsytu dostupnykh vodnykh resursiv [Problems of water supply of the population with drinking water due to the deepening deficit of available water resources]. *Ekolohichni Nauky*, *7*(34), 134–144. http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2021/7/25.pdf. DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.23

2. Strokal, V. P., & Kovpak, A. V. (2022). Voyenni konflikty ta voda: Naslidky y ryzyky [Military conflicts and water: Consequences and risks]. *Ekolohichni Nauky*, *5*(44), 94–102. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14

3. Shmychkova, O., Protsenko, V., & Velichko, O. (2021). Ochyshchennya stichnykh vod vid farmatsevtychnykh preparativ: Ohlyad literatury [Wastewater treatment from pharmaceutical preparations: A literature review]. *Pytannya Khimiyi i Khimichnoyi Tekhnolohiyi*, *3*, 4–31. DOI: http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2021-136-3-4-31

4. Alguacil, F. J., & Lopez, F. A. (2021). Adsorption Processes in the Removal of Organic Dyes from Wastewaters: Very Recent Developments. In *Selection of our books indexed in the Book Citation Index in Web of Science™ Core Collection (BKCI)*. P. 1–11. https://scispace.com/pdf/adsorption-processes-in-the-removal-of-organic-dyes-from-1sjhg5wda9.pdf. DOI: http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.94164

5. Xue, Y., Hou, H., & Zhu, S. (2009). Adsorption removal of reactive dyes from aqueous solution by modified basic oxygen furnace slag: Isotherm and kinetic study. *Chemical Engineering Journal*, *147*(2–3), 272–279. DOI:10.1016/j.cej.2008.07.017

6. Ghibate, R., Chrachmy, M., Alaqarbeh, M., Ansari, A., Ben Baaziz, M., Bouachrine, M., Taouil, R., & Senhaji, O. (2025). Comprehensive analysis of hazardous dye adsorption onto a green adsorbent: Experimental profiling, theoretical modeling, and deciphering potential molecular interactions. *Desalination and Water Treatment*, *321*, 100998. https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.100998

7. Meyer, F., Eigenbrod, C., & Wagner, V. (2020). Apparatus to investigate liquid oxygen droplet combustion in hydrogen under microgravity conditions. *Review of Scientific Instruments*, *91*(10), 105110. https://doi.org/10.1063/5.0020988

8. Belyanovskaya, E. A., Lytovchenko, R. D., Sukhyy, K. M.., Yeremin, O. O., Sukha, I. V., & Prokopenko, E. M. (2019). Operating regime of adsorptive heat-moisture regenerators based on composites “silica gel – sodium sulphate” and “silica gel – sodium acetate”. *Journal of Chemistry and Technologies*, *27*(2), 158–168. http://chemistry.dnu.dp.ua. DOI: https://doi.org/10.15421/081917

9. Li, Q. X., & Lueking, A. D. (2011). Effect of Surface Oxygen Groups and Water on Hydrogen Spillover in Pt-Doped Activated Carbon. *The Journal of Physical Chemistry*, *115*(10), 4273–4282. https://doi.org/10.1021/jp105923a

УДК 621.31, 681.52 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.16

О. М. ЛЕБЕДЬ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри природничо-наукової підготовки
Херсонська державна морська академія
ORCID: 0000-0001-5603-9244

ОЦІНКА ЯКОСТІ РОБОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ СУДНОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

На сьогоднішній день, до функціювання пристроїв генерації електричної енергії суднового електротехнічного комплексу, пред'являються дуже високі вимоги, перш за все пов'язані з їх економічною ефективністю. Особливу роль при цьому відіграють методи і способи проведення аналізу їх роботи для діагностування їх функціонального стану. З метою удосконалення методів діагностики функціювання пристроїв суднового електротехнічного комплексу створюються різноманітні математичні моделі. Головні вимоги до моделей – допомога оператору проаналізувати параметри роботи обладнання та його вчасне технічне обслуговування. Для технічного обслуговування створюються системи віддаленої діагностики і моніторингу технічного стану обладнання.

В даній роботі, приведена оцінка якості роботи напівпровідникового перетворювача частоти суднового електротехнічного комплексу. Проаналізовано методи діагностики його роботи та виокремлені основні проблеми зменшення економічності виробничого процесу. Вказано, що велика кількість обладнання та обслуговуючого персоналу, призводить до збільшення часу діагностики функціювання пристроїв.

На основі математичного моделювання, з використанням апарату нечіткої логіки Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox, отримані поверхні відклику оцінки якості роботи перетворювача частоти, що дають змогу оператору своєчасно діагностувати стан роботи перетворювача частоти в залежності від вихідних значень сили струму, напруги та температури напівпровідникових ключів. Продемонстровано функції належності лінгвістичних змінних вихідних параметрів напівпровідникового перетворювача частоти електротехнічного комплексу.

Зазначено, що збільшення бази правил лінгвістичних змінних, засновані на експертних оцінках, дадуть більш суттєву інформацію оператору для діагностики функціювання перетворювача частоти. Аналіз сформованих поверхонь відклику забезпечить диференційований підхід до його технічного обслуговування.

Ключові слова: *електротехнічний комплекс, напівпровідниковий перетворювач частоти, нечітка логіка, Matlab Simulink, Fuzzy Logic Toolbox.*

O. M. LEBED
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Natural Sciences
Kherson State Maritime Academy
ORCID: 0000-0001-5603-9244

EVALUATION OF THE QUALITY OF THE WORK OF A SEMICONDUCTOR FREQUENCY CONVERTER OF A SHIP ELECTRICAL COMPLEX BASED ON FUZZY LOGIC

Today, very high requirements are imposed on the operation of electrical energy generation devices of the ship's electrical complex, primarily related to their economic efficiency. A special role is played by methods and means of analyzing their operation to diagnose their functional state. In order to improve the methods of diagnosing the operation of devices of the ship's electrical complex, various mathematical models are created. The main requirements for the models are to help the operator analyze the parameters of the equipment's operation and its timely maintenance. Systems of remote diagnostics and monitoring of the technical condition of the equipment are created for maintenance.

This paper provides an assessment of the quality of operation of a semiconductor frequency converter of the ship's electrical complex. Methods for diagnosing its operation are analyzed and the main problems of reducing the cost-effectiveness of the production process are identified. It is indicated that a large number of equipment and service personnel leads to an increase in the time for diagnosing the operation of devices.

Based on mathematical modeling, using the fuzzy logic apparatus Matlab Simulink with the Fuzzy Logic Toolbox extension, response surfaces for assessing the quality of the frequency converter's operation were obtained, which allow the operator to timely diagnose the state of the frequency converter's operation depending on the output values of current, voltage and temperature of semiconductor switches. The membership functions of linguistic variables of the output parameters of the semiconductor frequency converter of the electrical complex are demonstrated.

It is noted that the increase in the rule base of linguistic variables, based on expert assessments, will provide more significant information to the operator for diagnosing the operation of the frequency converter. Analysis of the formed response surfaces will provide a differentiated approach to its maintenance.

Key words: *electrical complex, semiconductor frequency converter, fuzzy logic, Matlab Simulink, Fuzzy Logic Toolbox.*

Постановка проблеми

Основним показником роботи і економічності будь-якого електротехнічного комплексу являється якість електричної енергії, яку споживають користувачі. Особливу роль при цьому відіграють перетворювачі частоти (ПЧ), які здатні сформувати необхідну частоту вихідного сигналу для певних типів споживачів. Перетворювачі частоти дають можливість підтримувати параметри електричної енергії при змінних характеристиках явищ, що приводять до генерації електричної енергії.

При досягненні певного часу роботи ПЧ, його експлуатаційні характеристики погіршуються. Виявлення відхилення номінальних значень параметрів роботи елементів ПЧ потребує значної кількості обладнання та обслуговуючого персоналу. Тому для технічного обслуговування створюються системи віддаленої діагностики і моніторингу технічного стану обладнання.

Діагностика і своєчасне технічне обслуговування електротехнічного комплексу та його складових здатні збільшити їх загальний час експлуатації та енергоефективність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із основних складових технічного обслуговування ПЧ електротехнічного комплексу являється моніторинг параметрів його роботи. Дослідження зміни його вихідних параметрів дає можливість зрозуміти його стан і завчасно провести технічне обслуговування, не доводячи до серйозних поломок та суттєво зменшити час простою [1, 2]. Час простою часто наносить більше матеріальних збитків порівняно з заміною комплектуючих блоків та деталей. Періодичність проведення моніторингу залежить від часу експлуатації та потужності споживачів електричної енергії змінного струму.

Некоректна робота ПЧ також впливає на термін та умови роботи споживачів, особливо електронних суднових двигунів [3, 4]. Як зазначено в [5], кожний рік виходить зі складу 30 % електричних двигунів промисловості, а на транспорті ці цифри добігають значення 70 %. При цьому термін роботи відремонтованих двигунів зменшується від 0,5 до 1,5 року, а 22 % взагалі замінюються резервними, так як їх подальша експлуатація недоцільна.

При цьому слід зауважити, що традиційна стратегія технічного обслуговування і ремонту складних технічних систем, заснована на планово-попереджувальному ремонті, втратила свою актуальність на теперішній час. На перший план виходить стратегія управління експлуатаційною надійністю пристроїв за їх технічним станом, тобто до моніторингу параметрів їх роботи на протязі певного часу з метою прогнозування їх зміни [6].

Одним із найпоширеніших методів управління, автоматизації та моніторингу електротехнічних систем являється застосування апарату нечіткої логіки. Алгоритм роботи систем на базі нечіткої логіки відмінний від методів дискретної математики і схожий на спосіб людського мислення. При цьому змінні параметри набувають значень в діапазоні від 0 до 1 і носять імовірнісний характер. База правил нечіткої логіки основується на людському досвіді [7].

Застосування апарату нечіткої логіки широко застосовується при розробленні методів управління, моніторингу та діагностики на морському транспорті. Регулювання енергоефективності роботи суднових котельних установок [8], підвищення елементів безпеки плавання судна за недостатньої навігаційної інформації [9], моніторингу і управління роботою генератора змінного струму [10] та інших.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи являється створення математичної моделі оцінки якості роботи ПЧ на базі нечіткої логіки в середовищі Matlab Simulink для діагностики стану і необхідності проведення технічного обслуговування.

Викладення основного матеріалу дослідження

В судновому електротехнічному комплексі застосовують ПЧ із ланкою постійного струму. Основні вузли ПЧ із ланкою постійного струму – це випрямляч та інвертор, який безпосередньо перетворює постійний струм в змінний потрібної частоти. В якості основного елементу інвертора, що формує вихідну напругу являються напівпровідникові тиристори або транзистори, що працюють в якості силового ключа. Для отримання якісного вихідного сигналу використовуються багаторівневі ПЧ [11]. В результаті на якість роботи ПЧ суттєво впливає коректна робота силових напівпровідникових ключів.

Для визначення технічного стану обладнання пристроїв електротехнічного комплексу, застосування апарату нечіткої логіки дає можливість діагностувати їх стан в умовах невизначеності. Нечіткі системи повинні мати певний масив даних, які містять функції належності та її опис, множину нечітких правил, спосіб виводу.

В якості моделі експертної системи технічного стану ПЧ вхідними змінними являються вихідний струм, вихідна напруга, температура напівпровідникових ключів. Вихідна змінна – стан роботи ПЧ, формується по алгоритму нечіткого виводу Мамдані-Заде. При цьому параметри вхідних характеристик визначені в відносних одиницях, номінальні параметри яких рівні 1.

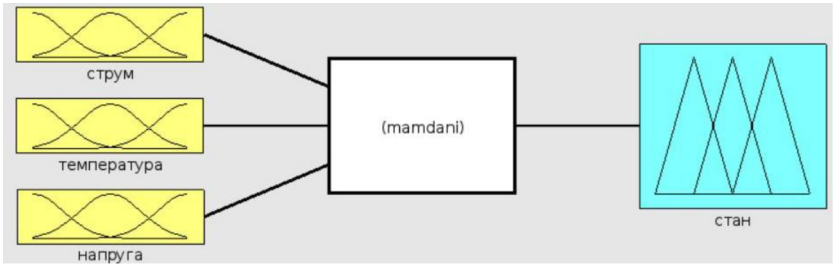


Рис. 1. Структурна схема системи Мамдані-Заде

На рисунку 1 приведена схема розробленої системи в середовищі Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox.

На рисунках 2–4 показані терми вхідних лінгвістичних змінних. На рисунку 1 показано лінгвістичну змінну «вихідний струм ПЧ» з термами: «нормальний», «високий». Лінгвістична змінна «вихідна напруга ПЧ» має терми: «низька», «нормальна», «висока» (рис. 3). Лінгвістична змінна «температура силових ключів ПЧ» (рис. 4) має терми: «низька», «нормальна», «висока».

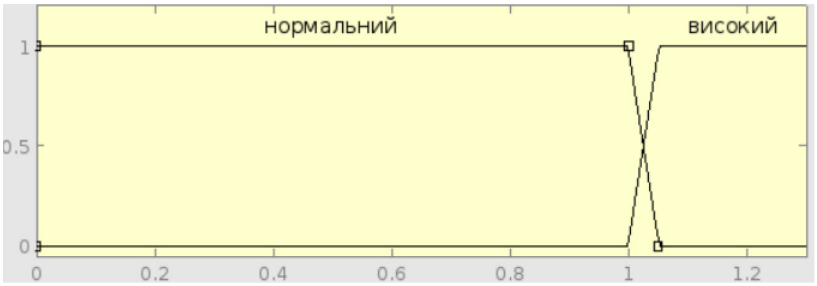


Рис. 2. Функція належності: струм

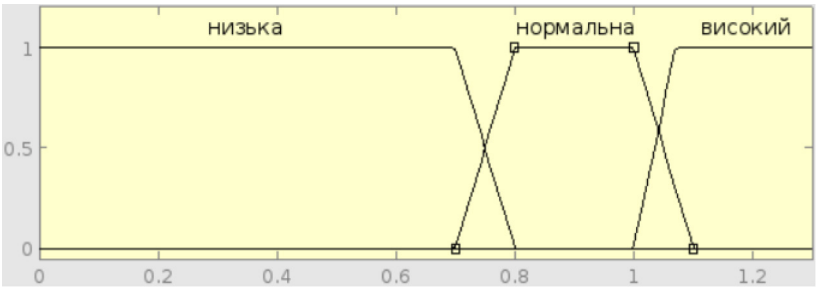


Рис. 3. Функція належності: напруга

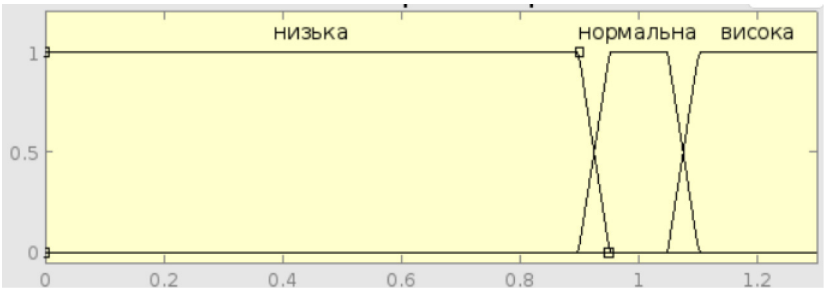


Рис. 4. Функція належності: температура

Функція належності «стан роботи ПЧ» наведена на рисунку 5, термами якої є «аварійний рівень», «попереджувальний рівень», «нормальний рівень».

Експертним шляхом був сформований набір правил стану роботи ПЧ від вхідних даних, якими є вихідний струм, вихідна напруга, температура силових ключів. База правил показана в таблиці 1.

Для розуміння взаємозв'язку вхідних лінгвістичних змінних і вихідної – отримані поверхні нечіткого виводу системи (рис. 6–8).

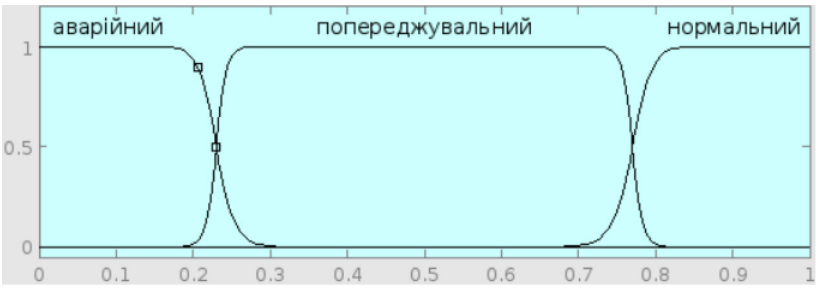


Рис. 5. Функція належності: стан роботи ПЧ

Таблиця 1

База правил лінгвістичних змінних

If (струм is нормальний) and (температура is нормальна) and (напруга is нормальна) then (стан is нормальний)
If (струм is нормальний) and (температура is висока) and (напруга is нормальна) then (стан is попереджувальний)
If (температура is висока) and (напруга is нормальна) then (стан is попереджувальний)
If (струм is високий) and (напруга is нормальна) then (стан is аварійний)
If (струм is високий) and (температура is нормальна) and (напруга is нормальна) then (стан is аварійний)
If (струм is високий) and (температура is висока) and (напруга is нормальна) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (напруга is низька) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (температура is нормальна) and (напруга is низька) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (температура is висока) and (напруга is низька) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (температура is висока) and (напруга is висока) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (температура is нормальна) and (напруга is висока) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (напруга is висока) then (стан is аварійний)
If (струм is високий) and (температура is низька) and (напруга is висока) then (стан is аварійний)
If (струм is нормальний) and (температура is низька) and (напруга is висока) then (стан is аварійний)

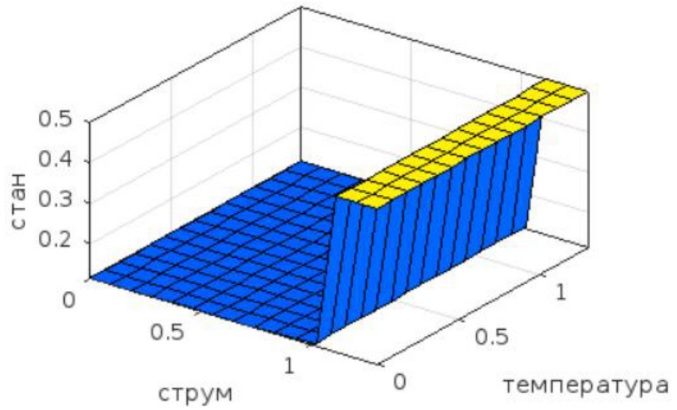


Рис. 6. Поверхня відклику стану роботи перетворювача частоти від температури ключа та вихідного струму

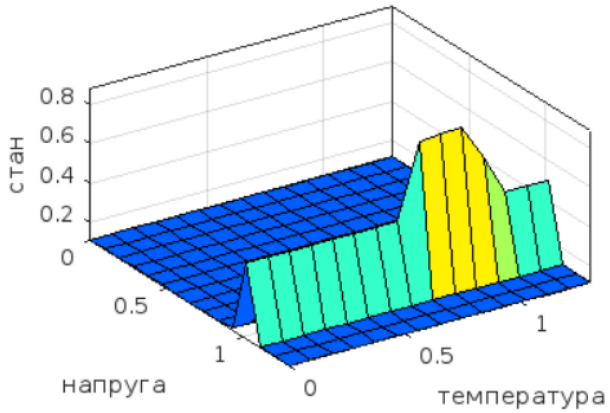


Рис. 7. Поверхня відклику стану роботи перетворювача частоти від температури ключа та вихідної напруги

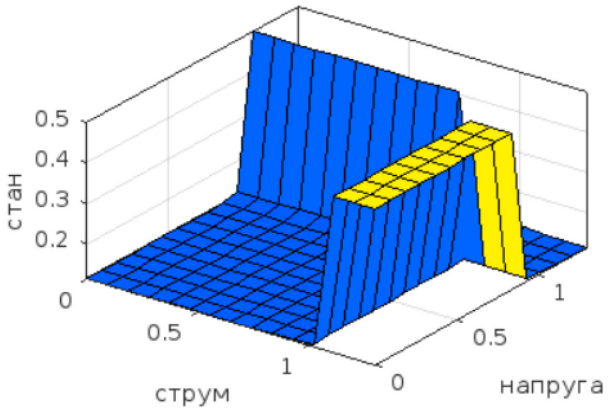


Рис. 8. Поверхня відклику стану роботи перетворювача частоти від вихідної напруги та вихідного струму

Висновки

На базі нечіткої логіки отримані поверхні відклику робочого стану перетворювача частоти суднового електротехнічного комплексу. Дані поверхні дають можливість оператору діагностувати та надати рекомендації щодо його технічного обслуговування

Таким чином можна стверджувати, що використання апарату нечіткої логіки дає можливість підвищити якість та зменшити терміни технічного обслуговування перетворювача частоти суднового електротехнічного комплексу при моніторингу його технічного стану.

Список використаної літератури

1. Гобрей Р. М., Рубаненко Е. І. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. Частина 1. Київ : «ДП НТУКЦ», 2008. 528 с.

2. Гобрей Р. М, Шинкаренко Г. В., Коліушко Г. М., Болдирєв Д. Г. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. Частина 2. Київ : «ДП НТУКЦ», 2011. 1008 с.

3. Тараненко С. В., Голубєва С. М. Аналіз показників надійності суднових електродвигунів, що використовуються у сучасному судновому обладнанні. *Водний транспорт*, 2021. № 2(33). С. 5–12. https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01.

4. Губаревич О. В., Голубєва С. М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*, 2019. № 1(21). С. 55–63. https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63

5. Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К., Чорна О. А. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів: навчальний посібник. Кременчуг : ЧП Щербатих А. В., 2019. 122 с.

6. Бешта О. С. Худолій С. С. Визначення впливу дискретизації на процес ідентифікації динамічних параметрів. *Сборник научных трудов НГУ*, 2002. № 15, Т. 1. С. 161–167.

7. Граф, М. С., Свінцицька, О. М., Артамонов, Є. Б. Нечітке моделювання для аналізу та прогнозування в складних інформаційних системах. *Технічна інженерія*, 2024. № 1(93), С. 139–146. https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-139-146

8. J. Jose, K. Nafeesa, K. Mohamed Ismail Yasar Arafath. Fuzzy logic based control of marine boiler system. *International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, 2015. pp. 1–5. DOI: 10.1109/PICC.2015.7455797

9. Зазірний А. А. Визначення та контролю місця положення судна з використанням нечіткої логіки. *Водний транспорт*, 2023. № 2(38). С. 157–164. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18

10. Niketa N., Shantharama Rai. Design and modeling of fuzzy logic based voltage controller for an alternator. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2013. Vol. 2, no. 2. P. 155–158. https://doi.org/10.35940/ijrte.2277-3878

11. Лебедь О. М. Багаторівневі інвертори напруги суднового електротехнічного комплексу. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету*. Одеса, 2022, с. 174–175. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15422.36166

References

1. Hobrei R. M., Rubanenko E.I. (2008). Tekhnichne diahnostuvannia, vyprobuvannia ta vymiriuvannia elektroobladnannia v umovakh montazhu, nalahodzhuvannia i v ekspluatatsii. Chastyna 1 [Technical diagnostics, testing and measurement of electrical equipment in installation, commissioning and operation conditions. Part 1]. Kyiv : "DP NTUKTs", 528 p. [in Ukrainian].

2. Hobrei R. M, Shynkarenko H. V., Koliushko H. M., Boldyriev D. H. (2011). Tekhnichne diahnostuvannia, vyprobuvannia ta vymiriuvannia elektroobladnannia v umovakh montazhu, nalahodzhuvannia i v ekspluatatsii. Chastyna 2 [Technical diagnostics, testing and measurement of electrical equipment in installation, commissioning and operation conditions. Part 2]. Kyiv : "DP NTUKTs", 1008 p. [in Ukrainian].

3. Taranenko S. V., Holubieva S. M. (2021). Analiz pokaznykiv nadiinosti sudnovykh elektrodvyhuniv, shcho vykorystovuiutsia u suchasnomu sudnovomu obladnanni [Analysis of reliability indicators of marine electric motors used in modern marine equipment]. *Vodnyi transport*, no. 2(33). pp. 5–12. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.33298/2226-8553/2021.2.33.01

4. Hubarevych O. V., Holubieva S. M. (2019). Analiz metodiv diahnostyky tekhnichnoho stanu izoliatsii asynkhronnykh dvyhuniv [Analysis of methods for diagnosing the technical condition of insulation of asynchronous motors]. Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, no. 1(21). pp. 55–63. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63.

5. Chornyi O. P., Zachepa Yu. V., Tytiuk V. K., Chorna O. A. (2019). Monitorynh i diahnostyka elektromekhanichnykh obiektiv: navchalnyi posibnyk [Monitoring and diagnostics of electromechanical objects: a textbook]. Kremenchuh: ChP Shcherbatykh A. V., 122 p. [in Ukrainian].

6. Beshta O. S. Khudolii S. S. (2002). Vyznachennia vplyvu dyskretyzatsii na protses identyfikatsii dynamichnykh parametriv [Determining the impact of discretization on the process of identifying dynamic parameters]. *Sbornyk nauchnykh trudov NHU*, no. 15, V. 1. pp. 161–167. [in Ukrainian].

7. Hraf, M. S., Svintsytska, O. M., Artamonov, Ye. B. (2024). Nechitke modeliuvannia dlia analizu ta prohnozuvannia v skladnykh informatsiinykh systemakh [Fuzzy modeling for analysis and prediction in complex information systems]. *Tekhnichna inzheneriia*, no. 1(93), pp. 139–146. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-139-146

8. J. Jose, K. Nafeesa, K. Mohamed Ismail Yasar Arafath. (2015). Fuzzy logic based control of marine boiler system. *International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*, pp. 1–5. DOI: 10.1109/PICC.2015.7455797

9. Zazirnyi A. A. (2023). Vyznachennia ta kontroliu mistsia polozhennia sudna z vykorystanniam nechitkoi lohiky [Determining and controlling the location of a vessel using fuzzy logic]. *Vodnyi transport*, no. 2(38), pp. 157–164. [in Ukrainian]. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18

10. Niketa N., Shantharama Rai. (2013). Design and modeling of fuzzy logic based voltage controller for an alternator. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Vol. 2, no. 2. pp. 155–158. https://doi.org/10.35940/ijrte.2277-3878

11. Lebed O. M. (2022). Bahatorivnevi invertory napruhy sudnovoho elektrotekhnichnoho kompleksu [Multilevel voltage inverters of the ship's electrical complex]. *Materialy IV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi morskoi konferentsii kafedry SEU i TE Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu*. Odesa, pp. 174–175. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15422.36166

УДК 629.12, 681.52 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.17

О. М. ЛЕБЕДЬ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри природничо-наукової підготовки
Херсонська державна морська академія
ORCID: 0000-0001-5603-9244

Н. І. ЛЕБЕДЬ
викладач
Відокремлений структурний підрозділ «Морський фаховий коледж
Херсонської державної морської академії»
ORCID: 0009-0009-4539-2988

КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ХИТАВИЦІ СУДНА НА ОСНОВІ АКТИВНИХ ЦИСТЕРН З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Одним з найпоширеніших негативних явищ, яке впливає на морехідні якості судна, є хитавиця. Хитавиця виникає під дією змінних зовнішніх факторів і достатньо суттєво впливає на умови руху судна. Змінюється робота пропульсивної установки, збільшується опір руху судна, негативний фізіологічний вплив на людський організм. Найбільш негативними наслідками хитавиці є брочінг, слемінг, параметричний резонанс. В окремих випадках хитавиця може призвести до гибелі судна.

В даній роботі проаналізовані основні методи і способи стабілізації руху судна. Зазначено, що характеристики стабілізації руху судна починають нормуватися на етапах проектування судна, одними з основних аспектів якого є розробка технічних планів завантаження. Також для певних типів суден знижують площу ватерлінії і тим самим зменшують значення збуджуючих хитавицю моментів сил. Використання штормових діаграм при виборі певних режимів руху, може суттєво зменшити негативний вплив хитавиці.

Розглянуто основні типи стабілізаторів пасивного та активного типу, які використовують на судноплавстві. До них відносяться величні кілі, бортові керовані керма, гіроскопічний стабілізатор, пасивні та активні цистерни. Величні кілі і бортові керовані керма обмежені конструкцією судна і мало ефективні при малих швидкостях руху. Гіроскопічні стабілізатори окрім високої маси і габаритів виділяються своєю дорожнечею, що обмежує їх технічне використання. Пасивні цистерни ефективні лише при резонансній хитавиці. При цьому активні цистерни зменшують амплітуду хитавиці при різних частотах. Основна проблема активних цистерн – це складна система управління їх роботою в зовнішніх умовах, що постійно змінюються.

На основі математичного моделювання, з використанням апарату нечіткої логіки Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox, розроблено систему управління роботою клапанів компресорів для зменшення негативного впливу хитавиці на морехідні якості судна. Продемонстровано функції належності вхідних та вихідної лінгвістичних змінних.

Ключові слова: *хитавиця судна, заспокоювач хитавиці, нечітка логіка, Matlab Simulink, Fuzzy Logic Toolbox.*

O. M. LEBED
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Natural Sciences
Kherson State Maritime Academy
ORCID: 0000-0001-5603-9244

N. I. LEBED
Lecturer
Separated Structural Unit “Maritime Applied College
of Kherson State Maritime Academy”
ORCID: 0009-0009-4539-2988

CONTROL OF SHIP ROLLING PARAMETERS BASED ON ACTIVE TANKS USING THE MATHEMATICAL APPARATUS OF FUZZY LOGIC

One of the most common negative phenomena affecting the seaworthiness of a vessel is pitching. Pitching occurs under the influence of variable external factors and significantly affects the conditions of the vessel’s movement. The operation of the propulsion system changes, the resistance to the vessel’s movement increases, and there is a negative physiological

effect on the human body. The most negative consequences of pitching are broaching, slamming, and parametric resonance. In some cases, pitching can lead to the death of the vessel.

This paper analyzes the main methods and techniques for stabilizing the movement of a vessel. It is noted that the characteristics of stabilizing the movement of a vessel begin to be standardized at the stages of designing a vessel, one of the main aspects of which is the development of technical loading plans. Also, for certain types of vessels, the waterline area is reduced, thereby reducing the value of the moments of force that excite pitching. The use of storm diagrams when choosing certain movement modes can significantly reduce the negative impact of pitching.

The main types of passive and active stabilizers used in shipping are considered. These include bilge keels, side steerable rudders, gyroscopic stabilizers, passive and active tanks. Bile keels and side steerable rudders are limited by the vessel design and are not very effective at low speeds. Gyroscopic stabilizers, in addition to their high weight and dimensions, are distinguished by their high cost, which limits their technical use. Passive tanks are effective only with resonant pitching. At the same time, active tanks reduce the pitching amplitude at different frequencies. The main problem with active tanks is the complex control system for their operation in constantly changing external conditions. Based on mathematical modeling, using the fuzzy logic apparatus Matlab Simulink with the Fuzzy Logic Toolbox extension, a control system for the operation of compressor valves has been developed to reduce the negative impact of pitching on the seaworthiness of a vessel. Membership functions of input and output linguistic variables are demonstrated.

Key words: *ship roll, roll stabilizer, fuzzy logic, Matlab Simulink, Fuzzy Logic Toolbox.*

Постановка проблеми

Суттєвим фактором, що впливає на морехідні якості судна є його хитавиця. Хитавиця здатна призвести до негативних наслідків і катастроф, вона впливає на швидкісні та маневрові параметри судна. При цьому можлива повна втрата керованості судна, падіння остійності.

До негативних наслідків хитавиці можна також віднести деформації елементів судна під дією знакозмінних навантажень, які є наслідком не лише постійної зміни параметрів хитавиці, а й того, що при хитавиці різні частини судна мають різні прискорення. Прискорення верхніх частин корпусу судна мають значно вищі значення, так як вони за однаковий час проходять більші відстані. Наявність сил інерції та гіроскопічних сил також призводить до дестабілізації руху судна.

Однозначний негативний фізіологічний вплив хитавиці судна на людський організм, що перш за все полягає впливом на вестибулярний апарат людини. Усунення цього впливу за рахунок фармакологічних засобів не завжди призводить до позитивних наслідків.

Найбільш небезпечними негативними явищами, які можуть призвести до загибелі судна є слемінг, брочинг, параметричний резонанс.

Застосування методів стабілізації хитавиці судна та способів її управління покращують його техніко-економічні характеристики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Заходи, які використовують для зменшення амплітуди хитавиці, починають на етапі проектування судна. Одним з головних чинників є розробка планів завантаження судна, так званий карго-план. Таким чином регулюється остійність судна для отримання оптимальних значень амплітуди та періоду хитавиці [1, 2]. Також при конструюванні, здебільшого для круїзних лайнерів, зменшують площу ватерлінії [2, 3]. Це призводить до суттєвого зниження значень збуджуючих моментів і відповідно зменшення амплітуди хитавиці.

Зменшити негативний вплив хитавиці також можна за рахунок використання штормових діаграм. Дані діаграми ґрунтуються, перш за все, на погодних умовах районів плавання і дозволяють вибрати оптимальний курс і швидкість корабля [3]. Даних прийомів, зазвичай буває недостатньо і для стабілізації руху судна використовують спеціальні пристрої – заспокійники хитавиці. Загальний їх принцип дії полягає у створенні моменту, який протидіє збуджуючому хитавицю моменту. При цьому заспокійники хитавиці на реальних суднах, застосовують лише для бортової хитавиці, так як для інших типів хитавиці вони малоефективні.

Суттєво зменшити амплітуду коливань бортової хитавиці вдається за рахунок застосування виличних кілів [4, 5], встановлення бортових керованих керм [6]. Стабілізуюча дія цих механізмів найбільше проявляється при русі судна. Основний їх недолік – мала ефективність при відсутності руху судна.

Одним з найбільш ефективних заспокійників хитавиці є гіроскопічні стабілізатори [7, 8], застосування яких в окремих випадках, здатне повністю погасити хитавицю. Однак сфера застосування їх достатньо обмежена з-за складності конструкції та експлуатації, великої маси та габаритних розмірів, великої вартості обладнання.

Також, в якості заспокійника хитавиці, використовують пасивні та активні цистерни. Пасивні цистерни ефективні лише при резонансній хитавиці і мало застосовуються, так як при нерезонансних умовах можуть призвести навіть до збільшення амплітуди хитавиці. Активні ж цистерни здатні ефективно працювати при різних умовах, створюючи стабілізуючий момент при різних частотах [9, 10].

В активних цистернах, для перерозподілу рідини між цистернами, використовують компресор в повітряному каналі або гідравлічний насос в рідинному. При цьому, в залежності від зовнішнього хвилювання, настає

необхідність управляти роботою компресора чи насоса. Для управлінням перерозподілу рідини між цистернами, при постійно змінних зовнішніх умовах, слід використовувати апарат нечіткої логіки, в якій при побудові математичної моделі вхідні змінні не мають чіткого значення [11].

Формулювання мети дослідження

Створення математичної моделі управління бортовою хитавицею судна активними цистернами на базі нечіткої логіки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Основний рушій роботи активних цистерн є вода. Активні цистерни розташовуються по бортам судна з'єднані між собою певними каналами. Компресор, за допомогою стисненого повітря, перекачує воду з однієї цистерни в іншу, в залежності від кута крену і кутової швидкості судна. Значення кута крену і кутової швидкості фіксуються кренометром та датчика кутової швидкості. Основна задача управління хитавицею судна не допустити великих амплітуд і повернути судно в стан рівноваги.

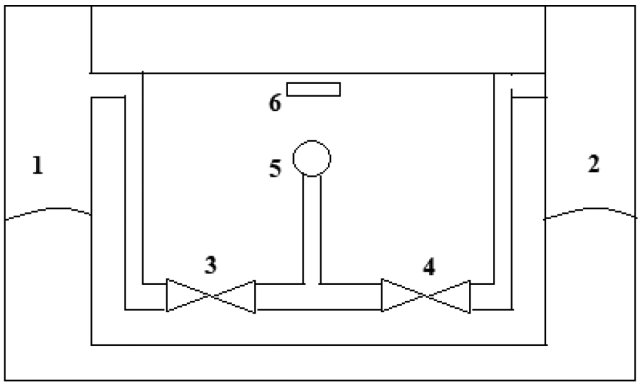


Рис. 1. Схема стабілізації судна активними цистернами

Схема процесу стабілізації судна за допомогою активних цистерн зображена на рис. 1. Бортові цистерни 1 і 2, з'єднані в нижній частині каналом, а у верхній – повітряним трубопроводом.

Подача повітря від компресора 5 регулюється автоматичними клапанами 3 і 4. Модель нечіткої системи управління заспокоювачем хитавиці судна, ґрунтуючись на показаннях кренометра 6, таких як кут крену f і розрахованої кутової швидкості ω, формує керуючий сигнал на клапана 3 і 4 з метою забезпечити оптимальну затримку переливу рідини.

В якості системи управління використовується нечітка логіка, алгоритм нечіткого виводу Мамдані-Заде. Розглянуто систему управління для крену судна в одному напрямку, так як крен судна в різних напрямках симетричний.

На рисунку 1 приведена схема розробленої системи в середовищі Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox.

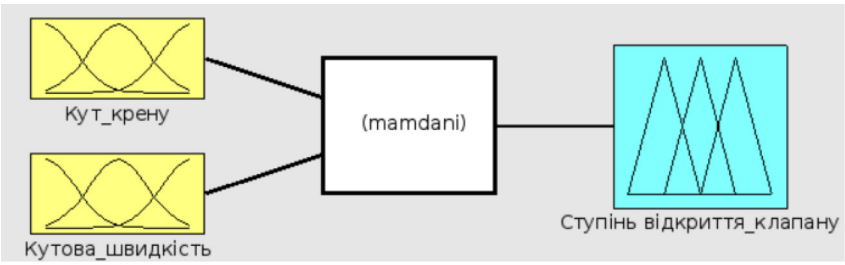


Рис. 2. Структурна схема системи Мамдані-Заде

Вхідні лінгвістичні змінні – кут крену і кутова швидкість, вихідна лінгвістична змінна – ступінь відкритості клапана.

На рисунках 3–4 графічно показано терми вхідних лінгвістичних змінних. Лінгвістична змінна «кут крену» має терми: f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 (рис. 3). Лінгвістична змінна «кутова швидкість» має терми: ω_1, ω_2, ω_3, ω_4. Значення термів визначено в відносних одиницях, по відношенню до максимальних значень кутів крену і кутової швидкості, номінальні параметри яких рівні 1.

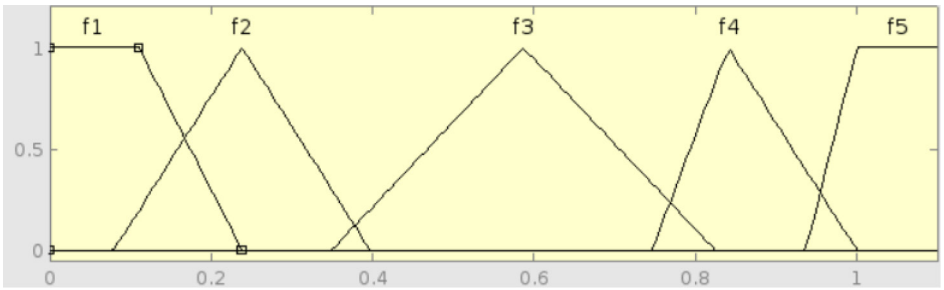


Рис. 3. Функція належності: кут крену

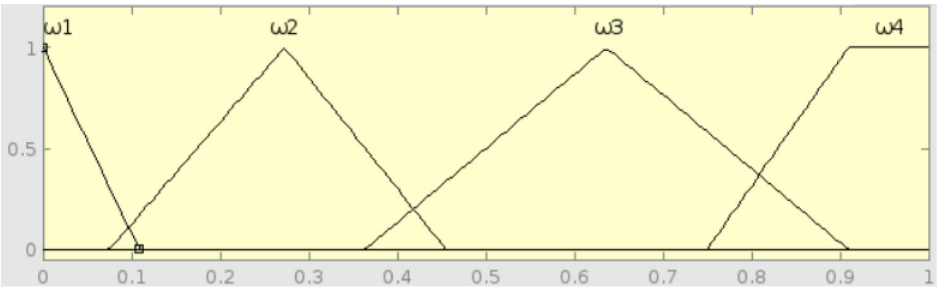


Рис. 4. Функція належності: кутова швидкість

Вихідна лінгвістична змінна «ступінь відкриття клапана» має терми: Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5. Вона регулює подачу повітря від насосу для витіснення води в ту чи іншу цистерну. Ця лінгвістична змінна пробігає значення термів від закритого клапану, що відповідає значенню «0» до «1», що відповідає повністю відкритому клапану (рис. 5).

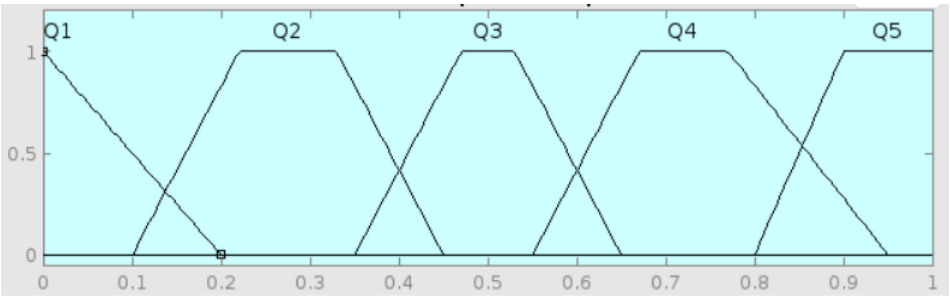


Рис. 5. Функція належності: ступінь відкриття клапана

Функція належності «ступінь відкритості клапана» має терми: закритий, трохи відкритий, наполовину відкритий, майже відкритий, відкритий.

Сформовано правила нечітких продукцій ступеня відкритості клапана (табл. 1).

На основі даних правил отримана поверхня нечіткого виводу управління ступенем відкритості клапана для регулювання параметрів хитавиці судна на основі активних цистерн (рис. 6).

Висновки

В середовищі Matlab Simulink з розширенням Fuzzy Logic Toolbox розроблена математична модель управління параметрами бортової хитавиці судна при використанні в якості заспокійників активних цистерн. Основою роботи даної математичної моделі є кількість і значення термів лінгвістичних змінних та їх база правил.

Таким чином можна стверджувати, що застосування апарату нечіткої логіки для керування роботою активних суднових цистерн, в якості заспокійника хитавиці, дає можливість знизити значення амплітуди хитавиці і покращити морехідні якості судна.

Таблиця 1

База правил лінгвістичних змінних

1.	If (f is f1) and (ω is ω1) then (Q is Q1)
2.	If (f is f1) and (ω is ω2) then (Q is Q2)
3.	If (f is f1) and (ω is ω3) then (Q is Q3)
4.	If (f is f1) and (ω is ω4) then (Q is Q3)
5.	If (f is f2) and (ω is ω1) then (Q is Q2)
6.	If (f is f2) and (ω is ω2) then (Q is Q3)
7.	If (f is f2) and (ω is ω3) then (Q is Q3)
8.	If (f is f2) and (ω is ω4) then (Q is Q4)
9.	If (f is f3) and (ω is ω1) then (Q is Q2)
10.	If (f is f3) and (ω is ω2) then (Q is Q3)
11.	If (f is f3) and (ω is ω3) then (Q is Q4)
12.	If (f is f3) and (ω is ω4) then (Q is Q5)
13.	If (f is f4) and (ω is ω1) then (Q is Q3)
14.	If (f is f4) and (ω is ω2) then (Q is Q4)
15.	If (f is f4) and (ω is ω3) then (Q is Q5)
16.	If (f is f4) and (ω is ω4) then (Q is Q5)
17.	If (f is f5) and (ω is ω1) then (Q is Q3)
18.	If (f is f5) and (ω is ω2) then (Q is Q5)
19.	If (f is f5) and (ω is ω3) then (Q is Q5)
20.	If (f is f5) and (ω is ω4) then (Q is Q5)

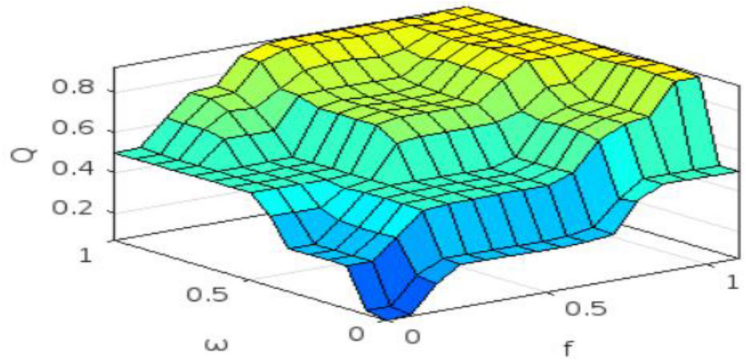


Рис. 6. Поверхня нечіткого виводу управління ступенем відкриття клапана

Список використаної літератури

1. Кротов О. І., Голіков В. І, Єганов О. Ю., Бондаренко О. В. Проектування морських транспортних суден. Миколаїв : УДМТУ, 2003. 156 с.

2. Misra, S. C. Design Principles of Ships and Marine Structures. CRC Press, 2016. 474 p.

3. Корніюк, В. Я., Кубіцький, Р. О., Буга, А. О., Москаленко, К. С. Забезпечення безпеки плавання судна на хвилюванні. *Морська безпека та оборона*, 2024. № 1. с. 23–35. https://doi.org/10.32782/msd/2024.1/04

4. Hasan Islam Copuroglu, Emre Peşman, Toru Katayama. Experimental and numerical investigation on the influence of bilge keel shape on roll damping. *Marine Structures*, 2025, V. 100. p. 103725. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103725

5. B. M. Shameem. CFD Analysis and Experimental Validation on the Effectiveness of Bilge Keel as a Roll Stabilizer. *International Journal of Computational Engineering Re search (IJCER)*, 2018. V. 08. I. 8. p. 8–12.

6. L. Liang, Q. Cheng, P. Cai, J. Li, Z. Le and Y. Jiang, Research of Combined Rudder and Fin Stabilizer Control Strategy for Ship. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Harbin, Heilongjiang, China, 2023. pp. 49–54. doi: 10.1109/ICMA57826.2023.10215670

7. Ribeiro e Silva, Varela J.M. Ship Gyroscopic Roll Stabilisation. *Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean*, 2022. V. 5B. p.18. https://doi.org/10.1115/OMAE2022-79530

8. Lifen Hu, Ming Zhang, Gang Li, Zhiming Yuan, Junying Bi, Yanli Guo. Multi-objective model predictive control for ship roll motion with gyrostabilizers. *Ocean Engineering, 2024*. V. 313(12). pp. 119412. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119412

9. M. Haro, R. Ferreiro F. J. Velasco. Ship's roll stabilization by anti-roll active tanks. *Oceans 2011 IEEE*, Spain, Santander, 2011. pp. 1–10. doi:10.1109/Oceans-Spain.2011.6003385

10. Osama A. Marzouk, Ali H. Nayfeh. Control of ship roll using passive and active anti-roll tanks. *Ocean Engineering*, 2009. V. 36. I. 9–10, pp. 661–671. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.03.005

11. Граф, М. С., Свінцицька, О. М., Артамонов, Є. Б. Нечітке моделювання для аналізу та прогнозування в складних інформаційних системах. *Технічна інженерія*, 2024. № 1(93). С. 139–146. https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-139-146

References

1. Krotov O. I., Holikov V. I, Yehanov O. Iu., Bondarenko O. V. (2003). Proektuvannia morskykh transportnykh suden [Design of marine transport vessels]. Mykolaiv: UDMTU, 156 p. [in Ukrainian].

2. Misra, S.C. (2016). Design Principles of Ships and Marine Structures. CRC Press, 474 p.

3. Korniiuk, V. Ya., Kubitskyi, R. O., Buha, A. O., Moskalenko, K. S. (2024). Zabezpechennia bezpeky plavannia sudna na khvyliuvanni [Ensuring the safety of a vessel sailing in rough seas]. *Morska bezpeka ta oborona*, no. 1. pp. 23–35. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32782/msd/2024.1/04

4. Hasan Islam Copuroglu, Emre Peşman, Toru Katayama. (2025). Experimental and numerical investigation on the influence of bilge keel shape on roll damping. *Marine Structures*, V. 100. p. 103725. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103725

5. B. M Shameem. (2018). CFD Analysis and Experimental Validation on the Effectiveness of Bilge Keel as a Roll Stabilizer. *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, V. 08. I. 8. p. 8–12.

6. L. Liang, Q. Cheng, P. Cai, J. Li, Z. Le and Y. Jiang, (2023). Research of Combined Rudder and Fin Stabilizer Control Strategy for Ship. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA),* Harbin, Heilongjiang, China, pp. 49–54. doi: 10.1109/ICMA57826.2023.10215670

7. Ribeiro e Silva, Varela J.M. (2022). Ship Gyroscopic Roll Stabilisation. *Proceedings of the ASME 2022 41st International Conference on Ocean*, V. 5B. p.18. https://doi.org/10.1115/OMAE2022-79530

8. Lifen Hu, Ming Zhang, Gang Li, Zhiming Yuan, Junying Bi, Yanli Guo. (2024). Multi-objective model predictive control for ship roll motion with gyrostabilizers. *Ocean Engineering*, V. 313(12). pp. 119412. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119412

9. M. Haro, R. Ferreiro F. J. Velasco. (2011). Ship's roll stabilization by anti-roll active tanks. Oceans 2011 IEEE, Spain, Santander, pp. 1–10. doi:10.1109/Oceans-Spain.2011.6003385

10. Osama A. Marzouk, Ali H. Nayfeh. (2009). Control of ship roll using passive and active anti-roll tanks. *Ocean Engineering*, V. 36. I. 9–10, pp. 661–671. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.03.005

11. Hraf, M. S., Svintsytska, O. M., Artamonov, Ye. B. (2024). Nechitke modeliuvannia dlia analizu ta prohnozuvannia v skladnykh informatsiinykh systemakh [Fuzzy modeling for analysis and prediction in complex information systems]. *Tekhnichna inzheneriia*, no. 1(93). pp. 139–146. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-139-146

УДК 631.365.22 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.18

В. О. ЛУКАШ
аспірант кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0003-5652-9798

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ І СУЧАСНИХ СПОСОБІВ СУШІННЯ ЗЕРНА: КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

У даній роботі розглядаються основні способи сушіння зерна, їхні особливості, переваги та недоліки. Обґрунтовано перспективність застосування різних способів комбінованого сушіння залежно від стану зернового шару. Використання комбінованих способів сушіння дає змогу суттєво підвищити швидкість процесу, зменшити енергоспоживання, забезпечити гнучке управління сушінням, що сприяє не лише збереженню всіх цінних якостей висушеного матеріалу, а й, у деяких випадках, їх покращенню. У промислових сушарках зерно зазвичай перебуває в стані щільного гравітаційно-рухомого, псевдозрідженого або зваженого шару. Стан шару визначає величину активної поверхні зерна, що контактує з сушильним агентом, а отже, й інтенсивність сушіння. Розглянуто основні технологічні прийоми, які сприяють підвищенню ефективності сушіння зерна, а також вимоги, яким повинні відповідати сучасні зерносушарки. Конструкція зерносушарки має забезпечувати рівномірний нагрів і сушіння зерна з надійним контролем температури та вологості під час сушіння. Сучасні зерносушарки повинні бути універсальними, тобто придатними для сушіння зерна різних культур. Окреслено шляхи розв'язання проблеми зниження енергоємності сушіння, а також пріоритетні напрями підвищення його ефективності. Підвищити ефективність сушіння зерна дозволяють такі фактори: збільшення активної поверхні зерна, що бере участь у процесах тепло- і вологообміну; підвищення температури зерна перед сушінням і його охолодження, що досягається завдяки попередньому підігріву зерна на етапах, що передують сушінню. Пріоритетними напрямами підвищення ефективності сушіння зерна є раціональне поєднання технологічних прийомів зневоднення зерна, інтенсифікація випаровування вологи з матеріалу та зниження енергетичних витрат, необхідних для здійснення цього процесу. Класифікація та аналіз наявних технологічних і конструктивних схем зерносушарок із поперечним продуванням зернового шару дали змогу визначити їхні недоліки. Це, у свою чергу, дозволяє розробити шляхи усунення недоліків та підвищити ефективність процесу сушіння зерна.

Ключові слова: *сушіння зерна, зерносушарка, зерновий шар, технологічний процес, інтенсивність сушіння.*

V. O. LUKASH
Postgraduate Student at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0003-5652-9798

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRADITIONAL AND MODERN METHODS OF GRAIN DRYING: CLASSIFICATION AND DEVELOPMENT PROSPECTS

This paper discusses the main methods of grain drying, their features, advantages and disadvantages. The feasibility of applying various combined drying techniques depending on the state of the grain layer is substantiated. The use of combined drying methods significantly increases process efficiency, reduces energy consumption, and enables flexible drying control. This not only preserves all the valuable qualities of the dried material but, in some cases, enhances them. In industrial dryers, grain typically exists in a dense gravity-flowing, fluidized, or suspended layer. The state of the layer determines the active surface area of the grain in contact with the drying agent, thereby influencing drying intensity. The study explores key technological approaches that enhance grain drying efficiency and outlines the requirements for modern grain dryers. The design of a grain dryer must ensure uniform heating and drying of the grain, with reliable temperature and humidity control throughout the drying process. Modern grain dryers should be versatile, meaning they must be suitable for drying various crop types. The study identifies solutions to reduce the energy intensity of drying and highlights priority directions for improving its efficiency. Factors that enhance grain drying efficiency include increasing the active surface area involved in heat and moisture exchange, preheating the grain before drying, and cooling it afterward. This is achieved through preliminary heating in the stages preceding the drying process. Priority directions for improving grain drying efficiency involve the rational integration of dehydration techniques, intensification of moisture evaporation, and reduction of energy expenditures required for the process. The classification and analysis of existing technological and structural grain dryer designs with cross-flow ventilation have made it possible to identify their limitations. This, in turn, allows for the development of strategies to address these shortcomings and improve the grain drying process.

Key words: *grain drying, grain dryer, grain layer, technological process, drying intensity.*

Постановка проблеми

Сушіння зернових культур є складним технологічним процесом, який повинен не лише зберігати якість зерна, а й покращувати його характеристики. Тому розробка ефективних конструкцій сушарок, а також правильний підбір способів і режимів сушіння залишаються одними з головних завдань сільського господарства [1]. Незважаючи на наявність багатьох сучасних зерносушарок як вітчизняного, так і закордонного виробництва, ця проблема досі актуальна. Класифікація та аналіз сушильного обладнання і технологій дозволяють визначити переваги й недоліки існуючих способів сушіння зерна та розробити шляхи для інтенсифікації даного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасна теорія сушіння вологих матеріалів ґрунтується на дослідженнях, викладених у працях Станкевича Г. М. [2], Гапонюка О. І. [3], Дідуха В. Ф. [4] та інших учених. Вагоме значення для розвитку технологій і вдосконалення обладнання мають роботи Котова Б. І. [5], Бурдо О. Г. [6], Степаненка С. П. [7] та інших фахівців. У працях Снєжкіна Ю. Ф. [8], Кірчука Р. В. [9], Ящука А. А. [10], Петрової Ж. О. [11] запропоновано різні способи сушіння, які сприяють більш рівномірному випаровуванню вологи та підвищенню інтенсивності процесу сушіння зерна.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є аналіз основних способів сушіння зерна; виявити особливості, переваги, недоліки та перспективи підвищення продуктивності процесу сушіння зерна.

Викладення основного матеріалу дослідження

Головним класифікаційним критерієм, що визначає конструктивно-технологічну схему сушильних установок, є сам процес сушіння. У сільськогосподарських підприємствах найбільш поширені зерносушарки, що працюють за конвективним способом сушіння. Це означає, що теплоносієм виступає або суміш топкових газів з атмосферним повітрям, або підігріте чисте повітря [12]. Даний спосіб застосовується у найпопулярніших видах зерносушарок, зокрема шахтних, барабанних, а також у сушарках періодичної та безперервно-періодичної дії (камерних, бункерних, а також у бункерах з активною вентиляцією), а також у системах з псевдозрідженим шаром [13]. У деяких із таких установок, крім основного конвективного сушіння, частково відбувається кондуктивний теплообмін. Це спостерігається, наприклад, при нагріванні зерна від гарячих поверхонь повітроводів у шахтних сушарках або при передачі тепла від рециркуляційного нагрітого зерна до холодного в рециркуляційних сушарках. Крім того, в деяких випадках спостерігається нетеплове сорбційне сушіння [14].

Найбільш ефективним є конвективний спосіб сушіння за умови примусового продування нагрітого повітря через шар зерна [15]. Від конструктивних особливостей сушильної установки, режимних параметрів процесу, а також співвідношення між характеристиками агента сушіння та зернового матеріалу залежить стан шару зерна, що відіграє ключову роль у процесі конвективного сушіння. Саме від цього параметра залежать інтенсивність тепло- і масообміну, а також інші характеристики зернового матеріалу, зокрема пористість, активна площа поверхні, опір шару, коефіцієнти теплопровідності та вологопровідності, а також процеси тепло- і вологообміну.

Залежно від швидкості руху потоку сушильного агента та зернового шару, сушіння може відбуватися у таких потоках: щільному нерухомому, щільному рухомому, псевдозрідженому («киплячому»), віброкиплячому, висхідному або низхідному. Найменш ефективним є сушіння в щільному нерухомому шарі зерна, прикладом якого є сушіння в бункерах або металевих ємностях із перфорованим дном. Такий спосіб відзначається значною нерівномірністю прогріву та видалення вологи. Ділянки зернового шару, що безпосередньо контактують із сушильним агентом, часто перегріваються та пересушуються, тоді як більш віддалені зони залишаються недосушеними. Товщина шару при такому способі зазвичай становить 600–1500 мм, а в рідкісних випадках зменшується до 350 мм [16]. Для уникнення перегріву зерна температура сушильного агента знижується, однак це призводить до збільшення тривалості сушіння, а також зростання витрат палива та електроенергії.

У сучасних зерносушарках найчастіше використовується щільний малорухомий шар зернової маси. Під дією сил гравітації цей шар поступово спускається вниз у шахті, колонці або сушильній камері. Товщина зернового шару, що безпосередньо взаємодіє із сушильним агентом, постійно змінюється в межах 0–150–300 мм, що забезпечує рівномірні умови для нагрівання та випаровування вологи. У цьому способі застосовується сушильний агент, температура якого значно перевищує допустиме нагрівання зерна у 120–160 °С. Об'ємна подача сушильного агента складає приблизно 3500 м^3 на годину на кожну тонну зерна, а сам процес нагрівання триває близько 15–20 хвилин. Такий підхід активно використовується в шахтних зерносушарках із системами підведення та відведення повітря, а також у камерних установках безперервного функціонування.

Сушіння в умовах псевдозрідженого шару відзначається високою інтенсивністю теплообміну між зерном і сушильним агентом. Зі збільшенням температури агента відбувається значне прискорення процесу. Наприклад, якщо температура підвищується з 60 до 140 °С, швидкість сушіння зростає у 2,5 раза, а час нагрівання зерна скорочується у 4 рази. Цей спосіб забезпечує рівномірне прогрівання зернової маси та ефективне використання теплоносія. Проте надмірно тривалий вплив високої температури може спричинити перегрівання зерна. Тому, незважаючи на високу інтенсивність процесу, широке промислове застосування такого способу ускладнене через брак надійних механізмів управління.

Спосіб сушіння у падаючому шарі зерна стає дедалі популярнішим. Найбільш поширеним є протиточний посіб, за якого зерно рухається вниз, а потік сушильного агента спрямовується у зворотному напрямку – знизу догори. Оскільки контакт зерна з агентом триває недовго, процес випаровування вологи відбувається мінімально. Саме тому такі сушарки здебільшого застосовують для оперативного нагрівання зерна перед його подальшим охолодженням та остаточним висушуванням у сушарках із щільним малорухомим шаром.

Таким чином, головною особливістю конструкції сушильних камер зерносушарок, що працюють за конвективним принципом, є варіативний стан зернового шару. Хоча сам тип шару залишається незмінним, коригування конструктивних характеристик (товщина шару, розташування та форма повітропроводів, наявність полиць, змішувачів, вібраційних елементів та інверторів, що визначають траєкторію руху зерна і сушильного агента) разом із регулюванням параметрів режиму (температурний рівень, швидкість подачі агента, вміст вологи, швидкість пересування зерна) дають можливість керувати станом зернового шару в заданих межах. Це дозволяє підвищувати інтенсивність перемішування, покращувати розпушення зерна, збільшувати активну поверхню, що бере участь у процесах тепло- та масообміну, а також змінювати тривалість перебування зерна в зоні сушіння – подовжувати її у разі псевдозрідженого шару або скорочувати для щільних шарів, залежно від необхідної експозиції.

На сьогодні не існує загальноприйнятої класифікації сушильних установок, тому багато науковців відмовилися від ідеї створення універсальної систематизації та розглядають окремі категорії сушарок відповідно до їх ключових характеристик [17].

Будь-яке вдосконалення сушильного обладнання спрямоване на підвищення його продуктивності, зокрема шляхом інтенсифікації процесу сушіння, певною мірою сприяє зменшенню витрат пального. Це підтверджується як результатами теоретичних досліджень, так і практикою використання сушильних агрегатів. Основою для підвищення ефективності сушильного процесу є підхід, що враховує закономірності внутрішнього вологообміну, а також механізми тепло- та масообміну. Оптимальне поєднання технологічних способів, які застосовуються у сучасних і перспективних зерносушарках, дозволяє досягти комплексного впливу як на випаровування вологи з поверхні зерна, так і на її переміщення всередині зернової маси.

Прискорення процесу внутрішнього переміщення вологи можливе за рахунок збільшення температури зернової маси та зменшення впливу термовологостійкості, що стає реальним завдяки впровадженню сучасних технологій сушіння. У свою чергу, збільшення швидкості зовнішнього вологообміну досягається шляхом підвищення швидкості руху та температури сушильного агента, а також за рахунок розширення зовнішньої поверхні зерна, що приймає участь у тепло- та масообмінних процесах із сушильним агентом.

Дослідження літературних джерел дало змогу класифікувати способи підвищення ефективності сушіння зерна (рис. 1). Цю класифікацію доцільно враховувати як при модернізації існуючих зерносушарок, так і під час розробки нових конструкцій.



Рис. 1. Класифікація способів підвищення продуктивності процесу сушіння зерна

Аналіз способів підвищення продуктивності процесу сушіння зерна (рис. 1) показав, що покращення зовнішнього тепло- та вологообміну, тобто процесів нагрівання зерна та, як наслідок, випаровування вологи з його поверхні, відбувається за рахунок зміни стану шару зерна, що сприятиме збільшенню активної зовнішньої поверхні.

Удосконалення технологічного процесу сушіння зерна повинна орієнтуватись, насамперед, на впровадження способів, що забезпечують рівномірний розподіл тепла та вологи. Однією з основних проблем сушіння у щільному

нерухомому або малорухомому шарі є неоднорідний прогрів і перегрівання окремих прошарків зерна. Рівень перегріву значною мірою залежить від таких факторів, як товщина шару зернової маси, температура сушильного агента, початкові та поточні температурні показники зерна і швидкість його руху. Останній параметр можна оцінити через тривалість часу інтенсивного продування товщі зерна сушильним агентом або повітряним потоком.

Дослідження показали, що через недосконаліть конструкції сушильної камери або шахти, температура нагрівання зерна в горизонтальному перерізі може варіюватися в межах 30–60 °С. Найвищі температурні показники спостерігаються у пристінних ділянках, що спричиняє пересушування зерна, а в окремих випадках – навіть займання дрібних частинок лушпиння та зерна. У вказаних зонах вологість зерна знижується на 2–5 % більше, ніж у середній частині шару.

Висновки

Підсумовуючи викладене, можна зробити висновки, що аналіз існуючих технологічних і конструктивних схем зерносушарок із поперечним продуванням зернового шару виявив основний недолік – нерівномірність сушіння зерна по товщині шару. Крім того, проблемою та перспективою подальших досліджень є дослідження порушення технологічного процесу через засмічення отворів у стінках камер, що спричинене невідповідністю конструктивно-технологічних параметрів вимогам процесу сушіння.

Список використаної літератури

1. Kumar C., Karim M., Joardder M. Intermittent drying of food products: a critical review. *Journal of Food Engineering*. 2014, 121, P. 48–57. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014.

2. Станкевич Г. М., Страхова Т. В., Атаназевіч В. І. Сушіння зерна. К. : *Либідь*, 1997. 352 с.

3. Гапонюк О. І., Остапчук М. В., Станкевич Г. М. Активне вентилювання та сушіння зерна. Монографія. Одеса : *Поліграф*. 2014. 324 с.

4. Дідух В. Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів. Монографія. Луцьк : *ЛДТУ*. 2002. 165 с.

5. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Степаненко С. П., Швидя В. О., Лісецький В. О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилювання, охолодження). Ніжин : Видавець ПП Лисенко М. М. 2017. 552 с.

6. Burdo O., Bezbakh I., Shyshov S., Zykov A., Yarovyi I., Gavrilov A., Bandura V., Mazurenko I. Research of Wheat Drying in a Microwave and Combined Filter-microwave Dryer. *Eureka: Life Sciences*. 2019, (5), P. 70–78.

7. Степаненко С. П., Швидя В. О., Коновал О. О., Попадюк І. С. Результати виробничих випробувань дослідного зразка вакуумної барабанної сушарки СВБ-10. *Механіка та автоматика агропромислового виробництва*. 2023, Вип. 3, С. 55–64.

8. Снєжкін Ю. Ф., Пазюк В. М., Петрова Ж. О., Чалаєв Д. М. Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна. Київ : Поліграф-Сервіс. 2018. 154 с.

9. Кірчук Р.В. Теоретичні передумови моделювання процесу сушіння дисперсних рослинних матеріалів. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк. 2017, Вип. 37, С. 47–56.

10. Ящук А. А. Дослідження сушіння вороху насіння льону олійного на сушарці зі спіралеподібними активаторами. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2013, Вип. 97(2), С. 489–495.

11. Petrova Zh. Investigation of drying process kinetics of composite granules. *Energy Engineering and Control Systems*. 2022, Vol. 8, No. 1, pp. 20–27. https://doi.org/10.23939/jeecs2022.01.020

12. Kaletnik G., Tsurkan O., Rimar T., Stanislavchuk O. Determination of the kinetics of the process of pumpkin seeds vibrational convective drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, 1, P. 50–57. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.195203

13. Paziuk V. M., Petrova Zh. O., Tokarchuk O. A., Yaropud V. M. Research of rational modes of drying rape seed. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019, 58, nr. 2, P. 303–310. DOI: 10.35633/INMATEH-58-33

14. Hashim N., Daniel O. Rahaman E. A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (Cucurbita Moschata) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2014, 2, P. 345–352.

15. Kotov B. I., Spirin A. V., Kalinichenko R. A., Bandura V. M., Polievoda Yu. A., Tverdokhlib I. V. Determination the parameters and modes of new heliocollectors constructions work for drying grain and vegetable raw material by active ventilation. *Research in Agricultural Engineering*. 2019, 65, P. 20–24. DOI:10.17221/73/2017-RAE

16. Bandura V., Kalinichenko R., Kotov B., Spirin A. Teoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, 4, nr. 8(94), P. 50–58. DOI:10.15587/1729-4061.2018.139314

17. Snezhkin J., Paziuk V., Petrova Zh., Tokarchuk O. Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering, Romania*. 2020, 61, nr. 2, P. 183–193.

References

1. Kumar, C., Karim, M., & Joardder, M. (2014). Intermittent drying of food products: a critical review. *Journal of Food Engineering*, 121, pp. 48–57. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014

2. Stankevych, H. M., Strakhova, T. V., & Atanazevich, V. I. (1997). Sushinnia zerna [Grain drying]. K. : Lybid. [in Ukrainian].

3. Haponiuk, O. I., Ostapchuk, M. V., & Stankevych, H. M. (2014). Aktyvne ventyliuvannia ta sushinnia zerna. Monohrafiia. [Active ventilation and drying of grain. Monograph.]. Odesa : Polihraf. [in Ukrainian].

4. Didukh, V. F. (2002). Pidvyshchennia efektyvnosti sushinnia silskohospodarskykh roslynnykh materialiv. Monohrafiia. [Improving the efficiency of drying agricultural plant materials. Monograph]. Lutsk. LDTU. [in Ukrainian].

5. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P., Shvydia, V. O., & Lisetskyi, V. O. (2017). Modeliuvannia tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh obiektakh pisliazbyralnoi obrobky i zberihannia zerna (separatsiia, sushinnia, aktyvne ventyliuvannia, okholodzhennia). [Modeling of technological processes in typical facilities for post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling)]. Nizhyn : Vydavets PP Lysenko M. M. [in Ukrainian].

6. Burdo, O., Bezbakh, I., Shyshov, S., Zykov, A., Yarovyi, I., Gavrilov, A., Bandura, V., & Mazurenko, I. (2019). Research of wheat drying in a microwave and combined filter-microwave dryer. *Eureka: Life Sciences*, (5), pp. 70–78.

7. Stepanenko, S. P., Shvydia, V. O., Konoval, O. O., & Popadiuk, I. S. (2023). Rezultaty vyrobnychykh vyprobuvan doslidnoho zrazka vakuumnoi barabannoi susharky SVB-10. [Results of production tests of the prototype vacuum drum dryer SVB-10]. *Mekhanika ta avtomatyka ahropromyslovoho vyrobnytstva*, Vyp. 3, pp. 55–64. [in Ukrainian].

8. Sniezhkin, Yu. F., Paziuk, V. M., Petrova, Zh. O., & Chalaiev, D. M. (2018). Teplonasosna zernosusharka dlia nasinnievoho zerna. [Heat pump grain dryer for seed grain]. Kyiv : Polihraf-Servis. [in Ukrainian].

9. Kirchuk, R.V. (2017). Teoretychni peredumovy modeliuvannia protsesu sushinnia dyspersnykh roslynnykh materialiv. [Theoretical prerequisites for modeling the drying process of dispersed plant materials]. *Silskohospodarski mashyny*, Vyp. 37, pp. 47–56. [in Ukrainian].

10. Yashchuk, A. A. (2013). Doslidzhennia sushinnia vorokhu nasinnia lonu oliinoho na sushartsi zi spiralepodibnymy aktyvatoramy. [Study of drying of oilseed flax heap on a dryer with spiral activators]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, Vyp. 97(2), pp. 489–495. [in Ukrainian].

11. Petrova, Zh. (2022). Investigation of drying process kinetics of composite granules. *Energy Engineering and Control Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 20–27. https://doi.org/10.23939/jeecs2022.01.020

12. Kaletnik, G., Tsurkan, O., Rimar, T., & Stanislavchuk, O. (2020). Determination of the kinetics of the process of pumpkin seeds vibrational convective drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, pp. 50–57. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.195203

13. Paziuk, V. M., Petrova, Zh. O., Tokarchuk, O. A., & Yaropud, V. M. (2019). Research of rational modes of drying rape seed. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 58, nr. 2, pp. 303–310. DOI: 10.35633/INMATEH-58-33

14. Hashim, N., Daniel, O., & Rahaman, E. (2014). A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (Cucurbita Moschata) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, pp. 345–352.

15. Kotov, B. I., Spirin, A. V., Kalinichenko, R. A., Bandura, V. M., Polievoda, Yu. A., & Tverdokhlib, I. V. (2019). Determination the parameters and modes of new heliocollectors constructions work for drying grain and vegetable raw material by active ventilation. *Research in Agricultural Engineering*, 65, pp. 20–24. DOI:10.17221/73/2017-RAE

16. Bandura, V., Kalinichenko, R., Kotov, B., & Spirin, A. (2018). Teoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 nr. 8(94), pp. 50–58. DOI:10.15587/1729-4061.2018.139314

17. Snezhkin, J., Paziuk, V., Petrova, Zh., & Tokarchuk, O. (2020). Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*, Romania, 61 nr. 2, pp. 183–193.

УДК 685.34.05 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.19

А. В. МАКАТЬОРА
аспірантка кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-9373-5169

Д. А. МАКАТЬОРА
кандидат технічних наук,
доцент кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1909-900X

М. А. ЗЕНКІН
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-8840-0572

В. О. КОХАНОВСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0002-4804-884X

А. І. КАРПЕШКО
аспірант кафедри машин та агрегатів поліграфічного виробництва
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0008-8265-0053

ФУНКЦІОНАЛЬНО-КОНСТРУКТИВНИЙ ВПЛИВ НОЖА З РИФЛЯМИ НА ПРОЦЕС ПОВЗДОВЖНЬОГО РІЗАННЯ МОНОЛІТНОЇ ГУМИ

Сучасні умови розвитку спонукають підприємства до яких висуваються головна вимога – зменшення енергетичних витрат. Існуючі машини для повздовжнього різання матеріалів в якості робочого органу здебільшого використовують леза ножів з різними геометричними параметрами, які не в повній мірі задовільнять цим вимогам, тому постає питання дослідження впливу нових конструкцій ножів при розрізанні різних типів матеріалу (мікропориста та монолітні гуми, повсть, шкіра тощо). Метою даного дослідження є визначення функціонально-конструктивного впливу ножа з нанесеними на його поверхню рифлів на процес повздовжнього різання монолітної гуми, розробка ефективного методу впливу величини зазору між твірними транспортуючих валиками і величини відстані від вертикальної осі обертання транспортуючих валиків до кромки леза ножа з рифлями на погонне зусилля різання монолітної гуми, шляхом використання рівнянь регресії. Дослідження проведені на експериментальній установці повздовжнього різання при використанні ножа з нанесеними на його поверхню рифлів. При проведенні експерименту був використаний рототабельний план другого порядку, що дозволив ефективно вирішити поставлені завдання оцінки впливу досліджуваних факторів на сумарну величину втрат при поздовжньому різані матеріалу та величину втрат на тертя матеріалу о грані нерухомого ножа з нанесеними на його поверхню рифлів (отриманні рівняння регресії та побудовані залежності), їх порівняння при використання різних типів ножів, а саме – геометричних форм: дугоподібною, одно- та двосторонньою заточками (з нанесенням на їх поверхню рифлів та без них); дозволяє сформулювати при проєктуванні машин даного типу наступні рекомендації, а саме вибору леза ножа (його геометричну форму), технологічні параметри конструкції машини, що дозволить покращити роботу машини та знизити енергетичні витрати на технологічний процес.

Ключові слова: *сумарна величина втрат, втрати на тертя матеріалу, транспортуючи валики, ніж.*

A. V. MAKATORA
Postgraduate Student at the Department of Printing Machines
and Automated Complexes
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-9373-5169

D. A. MAKATORA
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor at the Department of Printing Machines
and Automated Complexes
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-1909-900X

M. A. ZENKIN
Doctor of Sciences in Engineering, Professor,
Professor at the Department of Printing Machines and Automated Complexes
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-8840-0572

V. O. KOKHANOVSKYI
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Printing Machines
and Automated Complexes
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0002-4804-884X

A. I. KARPESHKO
Postgraduate Student at the Department of Printing Machines
and Automated Complexes
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0008-8265-0053

FUNCTIONAL AND CONSTRUCTIVE INFLUENCE OF A KNIFE WITH RIBBONS ON THE PROCESS OF LONGITUDINAL CUTTING OF MONOLITHIC RUBBER

Modern development conditions encourage enterprises to meet the main requirement – reducing energy costs. Existing machines for longitudinal cutting of materials as a working body mostly use knife blades with different geometric parameters that will not fully satisfy these requirements, so the question arises of studying the impact of new knife designs when cutting different types of material (microporous and monolithic rubbers, felt, leather, etc.). The purpose of this study is to determine the functional and constructive effect of a knife with grooves applied to its surface on the process of longitudinal cutting of monolithic rubber, to develop an effective method for influencing the size of the gap between the forming conveying rollers and the distance from the vertical axis of rotation of the conveying rollers to the edge of the blade of the knife with grooves on the linear effort of cutting monolithic rubber, using regression equations. The studies were carried out on an experimental installation of longitudinal cutting using a knife with grooves applied to its surface. During the experiment, a second-order rotatable plan was used, which made it possible to effectively solve the tasks of assessing the influence of the studied factors on the total value of losses during longitudinal cutting of the material and the amount of friction losses of the material on the face of a fixed knife with grooves applied to its surface (obtaining the regression equation and constructed dependencies), their comparison when using different types of knives, namely – geometric shapes: arcuate, one- and double-sided sharpening (with and without the application of grooves on their surface); allows you to formulate the following recommendations when designing machines of this type, namely the choice of a knife blade (its geometric shape), technological parameters of the machine design, which will improve the operation of the machine and reduce energy costs for the technological process.

Keywords: *total loss, friction losses of the material transporting rollers, knife.*

Вступ

Широке застосування машин для різання матеріалів в різних галузях промисловості обумовлено їх ефективністю виконання фінішних операцій, різних технологічних процесів. Особливе місце належить машинам повздовжнього різання матеріалів під час виконання їх обробки, а саме монолітної гуми для отримання бажаної товщини по всій поверхні. В сучасних умовах розвитку підприємств одним з актуальним питанням постає процес повздовжнього різання матеріалів до якого висуваються наступні вимоги: зменшення енергетичних витрат, собівартості робочого інструменту – леза ножа. Існуючі машини для різання матеріалів в якості робочого органу здебільшого використовують леза ножів з різними геометричними параметрами, які не в повній мірі задовільнять цим вимогам [2–11]. Виходячи з наступного виникає актуальна задача пошуку нових конструктивних рішень параметрів конструкцій ножів для машин повздовжнього різання, та їх перевірки стосовно енергетичних витратах. Одним із шляхів рішення даної задачі є використання леза ножа, що має односторонню заточку з нанесеними на його поверхню зубців, обґрунтування режимів та параметрів є предметом дослідження даної роботи.

Постановка проблеми

Метою роботи є обґрунтування режимів та параметрів робочого органу при різанні монолітної гуми, на основі врахування взаємодії робочих органів машини із оброблюваним матеріалом. Визначену проблематику було певною мірою досліджено в роботах [2–3, 6–11], зокрема були отримані рівняння регресії сумарних величин втрат на технологічний процес, що дали змогу прослідкувати залежність використання різних типів ножів при різанні певних матеріалів.

Формулювання мети дослідження

Залишається питання щодо визначення оптимальних параметрів взаємодії робочого органу (ножа з нанесеними на його поверхню рифлів) з механізмом транспортування в процесі виконання технологічної операції при обробці монолітної гуми. Також досі є актуальним питання визначення погонного зусилля для монолітної гуми при використанні леза ножа з рифлями та порівняння його із значеннями при використанні інших типів конструкцій ножів, а саме одно- та двосторонньою формою поперечного перерізу леза ножа.

Викладення основного матеріалу дослідження

Перевірка на адекватність фізичних моделей завжди супроводжується експериментальними дослідженнями, та є завершальною стадією проектування.

На енергетичні витрати в машинах поздовжнього різання впливає геометрія леза ножа та певні технологічні параметри (розташування кромки леза ножа відносно осей транспортуючого механізму, ступеню деформації матеріалу тощо), тому потрібно провести експериментальні дослідження, щодо визначення погонного зусилля різання матеріалів та порівняння витрат, що витрачається на процес.

Для вирішення даної задачі був проведений двох факторний експеримент [1, 12]:

$$y = F(x_1, x_2),$$

де y – критерій оптимізації, що визначає погоне зусилля q_p; x_1 і x_2 – керовані параметри (фактори), що характеризують: величину зазору між твірними транспортуючих валиків h в механізмі транспортування, та величину відстані від вертикальної осі обертання транспортуючих валиків механізму транспортування до кромки леза ножа з нанесеними на його поверхню рифлів a.

При визначені погонного зусилля q_p, необхідно провести двократну обробку матеріалу, що складається з двох етапів:

– розрізання матеріалу (монолітної гуми) визначається сумарна величина витрат на технологічний процес P тобто розрізання матеріалу;

– пропускання розрізаного матеріалу (монолітної гуми) в складеному вигляді площиною з'єднання через ніж для визначення величини витрат на тертя F (між матеріалом (монолітною гумую) та площиною леза ножа з нанесеними на його поверхню рифлів).

Відповідно різниця значень сумарної величини витрат P та величини витрат на тертя F, віднесена до величини ширини матеріалу, що обробляється дасть дійсну величину погонного зусилля різання монолітної гуми [1–3, 6–12]:

$$q_p = \frac{P - F}{B}. \quad (1)$$

Планування експерименту проводилося з використанням ротатабельного плану Бокса, загальна кількість дослідів [3, 6–12]:

$$N_{1,2} = 2^2 + 2 \cdot 2 + 5 = 13.$$

Іменування значення факторів, кодування, інтервали їх варіювання наведені в табл. 1, значення визначалися за співвідношеннями [3, 6–12]:

$$x_1 = \frac{x_i - 4,35}{1}; \quad x_2 = \frac{x_j - 5}{0,5}. \quad (2)$$

Таблиця 1

Таблиця варіювання діючих факторів, які підлягають дослідженню

Фактори	Рівні варіювання					Інтервал варіювання фактору
	–1,414	**–1**	**0**	**+1**	**+1,414**	
h, мм. (x_1)	2,95	3,35	4,35	5,35	5,75	1
a, мм. (x_2)	4,3	4,5	5	5,5	5,7	0,5

Обробка даних експерименту з визначення сумарної величини втрат на технологічний процес поздовжнього різання монолітної гуми ножом з нанесеними на його поверхню рифлів, представлена в табл. 2.

Таблиця 2

Матриця планування визначення сумарної величини втрат на технологічний процес

№	Матриця планування		Робоча матриця			Дані до розрахунку	
№	x_1	x_2	***h***	***a***	y_u	y_u	$(y_u - y_u)^2$
1	1	1	5,35	5,5	470	468,97	1,0596
2	–1	1	3,35	5,5	602	601,55	0,2055
3	1	–1	5,35	4,5	688	686,26	3,0288
4	–1	–1	3,35	4,5	746	744,84	1,3557
5	–1,414	0	2,95	5	704	702,47	2,3443
6	1,414	0	5,75	5	568	567,32	0,4564
7	0	–1,414	4,35	4,3	744	743,37	0,3938
8	0	1,414	4,35	5,7	490	488,44	2,4217
9	0	0	4,35	5	624	622,95	1,0996
10	0	0	4,35	5	622	622,95	0,9051
11	0	0	4,35	5	624	622,95	1,0996
12	0	0	4,35	5	622	622,95	0,9051
13	0	0	4,35	5	622	622,95	0,9051
						$\sum_1^{13} = 8126$	$\sum_1^{13} (y_u - \overline{y}_u)^2 = 16,18$

Для кожного досліду проводилося п’ять повторних вимірювань на нульовому рівні, після їх розшифровки визначалося середнє значення повторних вимірювань по кожному досліду, дані наведенні в табл. 2.

Знайдемо значення коефіцієнтів регресії для рівняння [12]:

$$y_u = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2. \quad (3)$$

Згідно [10]: $b_0 = 623,0$; $b_1 = -47,8$; $b_2 = -90,14$; $b_{12} = -18,5$; $b_{11} = 6,0$; $b_{22} = -3,5$.

Тоді рівняння (3) прийме вид:

$$y_u = 623,0 - 47,8x_1 - 90,14x_2 - 18,5x_1x_2 + 6,0x_1^2 - 3,5x_2^2. \quad (4)$$

Гіпотеза про адекватність рівняння (4) перевіряється в наступній послідовності.

Дисперсія адекватності:

$$S_{ad}^2 = \frac{16,18 - 4,9}{3} = 3,76.$$

Дисперсія відтворюваності:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{4,9}{4} = 1,23.$$

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_{расч(P)} = \frac{3,76}{1,23} = 3,06.$$

Рівняння (4) можна вважати адекватним з довірчою ймовірністю $\alpha_B = 0,95$, так як дотримується умова: $F_{табл} \geq F_{расч(P)}$, де $F_{табл} = 6,59$ [12].

Значимість коефіцієнтів регресії в рівнянні (4) перевіряємо згідно методиці описаній роботі [12].

Знайдемо середні квадратичні похибки в визначенні коефіцієнтів Δb_0; Δb_i; Δb_{ii}; Δb_{ij}: $S_{\{b_0\}}^2 = 0,2 \cdot 4,9 = 0,98$ і $S_{\{b_0\}} = 0,99$; $S_{\{b_i\}}^2 = 0,125 \cdot 4,9 = 0,6125$ і $S_{\{b_i\}} = 0,78$; $S_{\{b_{ii}\}}^2 = 0,1438 \cdot 4,9 = 0,7$ і $S_{\{b_{ii}\}} = 0,84$; $S_{\{b_{ij}\}}^2 = 0,25 \cdot 4,9 = 1,225$ і $S_{\{b_{ij}\}} = 1,11$.

Тоді значимість коефіцієнтів регресії:

$$\Delta b_0 = \pm 2 \cdot 0{,}99 = \pm 1{,}98; \quad \Delta b_i = \pm 2 \cdot 0{,}78 = \pm 1{,}56; \quad \Delta b_{ii} = \pm 2 \cdot 0{,}84 = \pm 1{,}68; \quad \Delta b_{ij} = \pm 2 \cdot 1{,}11 = \pm 2{,}22.$$

Порівнюючи абсолютні величини коефіцієнтів рівняння (4) та їх відповідні похибки, можна зробити наступні висновки, що всі коефіцієнти рівняння (4) з ймовірністю 95 % є значимими, а саме рівняння описує сумарну величину втрат при виконанні технологічної операції.

Враховуючи вирази (2), перейдемо до іменованих величинах:

$$y_u = 623{,}0 - 47{,}8(h - 4{,}35) - 90{,}14(a - 5) - 18{,}5(h - 4{,}35)(a - 5) + 6{,}0(h - 4{,}35)^2 - 3{,}5(a - 5)^2.$$

Після спрощення рівняння прийме вид:

$$P = 905{,}29 - 3{,}5a^2 + 6h^2 - 7{,}5h - (25{,}34 - 18{,}5h)a. \tag{5}$$

Отриманий вираз (5) – математичне рівняння величини сумарних втрат при виконанні поздовжнього різання.

Обробка даних експерименту з визначення величини втрат на тертя матеріалу о грані ножа з нанесеними на його поверхню рифлів, представлена в табл. 3.

Таблиця 3

Матриця планування визначення величини втрат на тертя матеріалу о грані ножа

№	Матриця планування		Робоча матриця			Дані до розрахунку	
№	x_1	x_2	h	a	y_u	y_u	$(y_u - y_u)^2$
1	1	1	5,35	5,5	386	385,50	0,2525
2	–1	1	3,35	5,5	494	493,18	0,6798
3	1	–1	5,35	4,5	564	563,53	0,2251
4	–1	–1	3,35	4,5	610	609,20	0,6344
5	–1,414	0	2,95	5	576	575,06	0,8896
6	1,414	0	5,75	5	468	466,63	1,8656
7	0	–1,414	4,35	4,3	610	608,80	1,4306
8	0	1,414	4,35	5,7	402	400,91	1,1961
9	0	0	4,35	5	512	512,12	0,0154
10	0	0	4,35	5	510	512,12	4,5122
11	0	0	4,35	5	512	512,12	0,0154
12	0	0	4,35	5	514	512,12	3,5187
13	0	0	4,35	5	512	512,12	0,0154
						$\sum_1^{13} = 6670{,}0$	$\sum_1^{13}(y_u - \overline{y}_u)^2 = 15{,}25$

Для кожного досліду проводилося п’ять повторних вимірювань на нульовому рівні, після їх розшифровки визначалося середнє значення повторних вимірювань по кожному досліду, дані наведенні в табл. 3.

Знайдемо значення коефіцієнтів регресії для рівняння (3):

Згідно [10]: $b_0 = 512{,}12$; $b_1 = -38{,}34$; $b_2 = -73{,}51$; $b_{12} = -15{,}5$; $b_{11} = 4{,}36$; $b_{22} = -3{,}64$.

Тоді рівняння (3) прийме вид:

$$y_u = 512{,}12 - 38{,}34x_1 - 38{,}34x_2 - 15{,}5x_1x_2 + 4{,}36x_1^2 - 3{,}64x_2^2. \tag{6}$$

Гіпотеза про адекватність рівняння (6) перевіряється в наступній послідовності.

Дисперсія адекватності:

$$S_{ad}^2 = \frac{15{,}25 - 8{,}1}{3} = 2{,}38.$$

Дисперсія відтворюваності:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{8{,}1}{4} = 2{,}02.$$

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_{расч(P)} = \frac{2{,}38}{2{,}02} = 1{,}18.$$

Рівняння (6) можна вважати адекватним з довірчою ймовірністю $\alpha_B = 0{,}95$, так як дотримується умова: $F_{табл} \geq F_{расч(P)}$ [12].

Значимість коефіцієнтів регресії в рівнянні (6) перевіряємо у вище викладеної методиці.

Знайдемо середні квадратичні похибки в визначенні коефіцієнтів Δb_0; Δb_i; Δb_{ii}; Δb_{ij}: $S^2_{\{b_0\}} = 0,2 \cdot 2,02 = 0,404$ і $S_{\{b_0\}} = 0,64$; $S^2_{\{b_i\}} = 0,125 \cdot 2,02 = 0,2525$ і $S_{\{b_i\}} = 0,5$; $S^2_{\{b_{ii}\}} = 0,1438 \cdot 2,02 = 0,29$ і $S_{\{b_{ii}\}} = 0,54$; $S^2_{\{b_{ij}\}} = 0,25 \cdot 2,02 = 0,505$ і $S_{\{b_{ij}\}} = 0,71$.

Тоді значимість коефіцієнтів регресії:

$$\Delta b_0 = \pm 2 \cdot 0,64 = \pm 1,28; \quad \Delta b_i = \pm 2 \cdot 0,5 = \pm 1,0; \quad \Delta b_{ii} = \pm 2 \cdot 0,54 = \pm 1,08; \quad \Delta b_{ij} = \pm 2 \cdot 0,71 = \pm 1,42.$$

Порівнюючи абсолютні величини коефіцієнтів рівняння (6) та їх відповідні похибки, можна зробити наступні висновки, що всі коефіцієнти рівняння (6) з ймовірністю 95 % є значимими, а саме рівняння описує величину втрат на тертя матеріалу о грані ножа.

Враховуючи вирази (2), перейдемо до іменованих величинах:

$$y_u = 512,12 - 38,34(h - 4,35) - 38,34(x_j - 5) - 15,5(h - 4,35)(x_j - 5) + 4,36(h - 4,35)^2 - 3,64(x_j - 5)^2.$$

Після спрощення рівняння прийме вид:

$$F = 524,98 + 1,23h + 65,5a - 15,5ah - 3,64a^2 + 4,36h^2. \quad (7)$$

Отриманий вираз (7) – математичне рівняння величини втрат на тертя матеріалу о грані ножа при виконанні поздовжнього різання.

Отримані математичні рівняння, а саме визначення сумарної величини втрат (5) та величини втрат на тертя матеріалу (7) дозволяють визначати погоне зусилля різання монолітної гуми (1) при використанні ножа з нанесеними на його поверхню рифлів. Підставляючи значення в рівняння (1) отримаємо середнє значення погонного зусилля монолітної гуми:

$$q_p = 3,167 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}.$$

Відхилення від отриманих раніше значень робот [10] та [11] відповідно складають $\Delta = 0,1$ % та $\Delta = 1,67$ %, отже розрахунки відповідають дійсності.

Висновки

Порівнюючи сумарні величини втрат при виконанні технологічної операції поздовжнього різання монолітної гуми ножом з нанесеними на його поверхню рифлів з іншими типами ножів:

при використанні ножа з односторонньою формою поперечного перерізу з нанесення на його поверхню рифлів та ножа з двосторонньою формою поперечного перерізу, отриманих в роботі [10], будемо мати:

$$\Delta P = \frac{991,04 - 622,95}{991,04} \cdot 100\,\% = 37,14\,\%,$$

при використанні ножа з односторонньою формою поперечного перерізу з нанесення на його поверхню рифлів та ножа з односторонньою формою поперечного перерізу без нанесення на його поверхню рифлів, отриманих в роботі [10], будемо мати:

$$\Delta P = \frac{759,38 - 622,95}{759,38} \cdot 100\,\% = 17,97\,\%.$$

Визначені відхилення свідчать, що при проєктування машин повздовжнього різання доцільно використовувати лезо ножа з односторонньою заточкою з нанесеними на його поверхню рифлями, що дозволить знизити сумарні величини втрат на технологічний процес, в порівнянні з одно- та двосторонньою заточками, що знизить енергетичні витрати на технологічний процес.

Список використаної літератури

1. Патент № 70012 Україна, МПК B 23 B 1/00, G 01 L 3/00. Спосіб визначення потужності, що витрачається на повздовжнє різання матеріалу / Д. А. Макатьора, В. І. Князєв ; заявник та патентовласник Київський державний університет технологій та дизайну. № u20031212100 ; заявл. 23.12.2003 ; опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9.

2. Makatora D. A., Makatora A. V., Zenkin M. A. Mathematical study of the influence of knife geometry with arc-like cross-sectional shape on the process of longitudinal felt cutting. Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes. 2022. № 1(47). P. 20–29. DOI: https://doi.org/10.32845/msnau.2022.1.4

3. Makatora D., Makatora A., Zenkin M. Mathematical modeling of a linear load of felt. Global Research Review. 2021. Vol. 1, No. 4. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.6421785

4. Макатьора Д. А., Князєв В. І. Аналіз впливу ножа з рифлями на силу просування матеріалу в процесі повздовжнього різання. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2004. № 3. С. 46–51.

5. Макатьора Д. А., Князєв В. І. Аналіз раціонального положення ножа та форми його поперечного перерізу в машинах типу «ДН». Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2004. № 1. С. 159–163.

6. Макатьора Д. А. Визначення погонного зусилля різання мікропористої гуми ножем з двосторонньою заточкою. Вісник ЧДТУ. 2013. № 2(65). С. 92–97.

7. Макатьора Д. А. Експериментальне дослідження з визначення погонного зусилля різання повсті, ножем з односторонньою заточкою. Вісник КНУТД. 2014. № 2(76). С. 113–123.

8. Макатьора Д. А. Експериментальне дослідження зусилля різання ножем з дугоподібною формою поперечного перерізу. Вісник Хмельницького національного університету. 2020. № 2(283). С. 229–234.

9. Макатьора Д. А. Математичне моделювання втрат при поздовжньому різанні матеріалу рифленим ножем з односторонньою формою поперечного перерізу. Вісник Хмельницького національного університету. 2020. № 4(287). С. 100–106.

10. Макатьора Д. А., Панасюк І. В. Визначення погонного зусилля різання монолітної гуми ножем з двосторонньою заточкою. Вісник Хмельницького національного університету. 2014. № 1(209). С. 31–35.

11. Макатьора Д. А., Панасюк І. В. Визначення погонного зусилля різання монолітної гуми ножем з односторонньою заточкою. Вісник ЧДТУ. 2014. № 1(71). С. 36–42.

12. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента. М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.

References

1. Patent № 70012 Ukraina, MPK B 23 B 1/00, G 01 L 3/00. Sposib vyznachennia potuzhnosti, shcho vytrachaietsia na povzdovzhnie rizannia materialu [Method for determining the power consumed for longitudinal cutting of material]. D. A. Makatora, V. I. Kniaziev ; applicant and patent owner Kyiv State University of Technologies and Design. No. u20031212100; appl. 23.12.2003; publ. 15.09.2004, Biul. № 9.

2. Makatora, D. A., Makatora, A. V., Zenkin, M. A. (2022). Mathematical study of the influence of knife geometry with arc-like cross-sectional shape on the process of longitudinal felt cutting. Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes, № 1 (47), P. 20–29. DOI: https://doi.org/10.32845/msnau.2022.1.4.

3. Makatora, D., Makatora, A., Zenkin, M. (2021). Mathematical modeling of a linear load of felt. Global Research Review, Vol. 1, No. 4. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.6421785

4. Makatora, D. A., Kniaziev, V. I. (2004). Analiz vplyvu nozha z ryfliamy na sylu prosuvannia materialu v protsesi povzdovzhnoho rizannia [Analysis of the influence of a fluted knife on the force of material advancement during longitudinal cutting]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu, № 3, P. 46–51.

5. Makatora, D. A., Kniaziev, V. I. (2004). Analiz ratsionalnoho polozhennia nozha ta formy yoho poperechnoho pererizu v mashynakh typu “DN” [Analysis of the rational position of the knife and the shape of its cross-section in machines of the “DN” type]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu, № 1, P. 159–163.

6. Makatora, D. A. (2013). Vyznachennia pohonnoho zusyllia rizannia mikroporystoi humy nozhem z dvostoronnoiu zatochkoiu [Determination of the linear force of cutting microporous rubber with a knife with double-sided sharpening]. Visnyk ChDTU, № 2(65), P. 92–97.

7. Makatora, D. A. (2014). Eksperymentalne doslidzhennia z vyznachennia pohonnoho zusyllia rizannia povsti, nozhem z odnostoronnoiu zatochkoiu [Experimental study on determining the linear force of cutting felt with a knife with one-sided sharpening]. Visnyk KNUTD, № 2(76), P. 113–123.

8. Makatora, D. A. (2020). Eksperymentalne doslidzhennia zusyllia rizannia nozhem z duhopodibnoiu formoiu poperechnoho pererizu [Experimental study of cutting force with a knife with an arcuate cross-sectional shape]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, № 2(283), P. 229–234.

9. Makatora, D. A. (2020). Matematychne modeliuvannia vtrat pry pozdovzhnomu rizanni materialu ryflenym nozhem z odnostoronnoiu formoiu poperechnoho pererizu [Mathematical modeling of losses during longitudinal cutting of material with a fluted knife with a one-sided cross-sectional shape]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, № 4(287), P. 100–106.

10. Makatora, D. A., Panasiuk, I. V. (2014). Vyznachennia pohonnoho zusyllia rizannia monolitnoi humy nozhem z dvostoronnoiu zatochkoiu [Determination of the linear force of cutting monolithic rubber with a knife with double-sided sharpening]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, № 1(209), P. 31–35.

11. Makatora, D. A., Panasiuk, I. V. (2014). Vyznachennia pohonnoho zusyllia rizannia monolitnoi humy nozhem z odnostoronnoiu zatochkoiu [Determination of the linear force of cutting monolithic rubber with a knife with one-sided sharpening]. Visnyk ChDTU, № 1(71), P. 36–42.

12. Tihomirov, V. B. (1974). Planirovanie i analiz jeksperimenta [Planning and analysis of the experiment]. Moscow : Legkaja industrija. 262 p.

УДК 621.785.5:629.5.02 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.20

О. М. МЕЛЬНИК
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0001-9228-8459

О. А. ОНИЩЕНКО
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри управління судном
Національний університет «Одеська морська академія»
ORCID: 0000-0002-3766-3188

С. В. КУРДЮК
доктор філософії, старший науковий співробітник
Національний університет «Одеська морська академія»
ORCID: 0000-0002-3165-4571

О. М. МАСЛІЙ
доктор педагогічних наук, професор
Військова академія (м. Одеса)
ORCID: 0000-0003-2809-2763

В. В. ОЧЕРЕТНА
доцент кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0003-4077-6711

КОМПЛЕКСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ БАГАТОФАЗНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТА КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ У МОРСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У статті представлено результати комплексного чисельного моделювання впливу багатофазного зміцнення на поведінку поверхневих шарів конструкційних сталей в умовах морської експлуатації. Модель об'єднує три етапи поверхневої обробки: лазерне гартування, електроіскрове легування та cold spray-напилення. У роботі реалізовано підхід до аналізу термомеханічної взаємодії між зміцненими шарами, а також враховано електрохімічну активність матеріалів у солоній воді. Результати моделювання показали, що товщина cold spray-покриття суттєво впливає на розподіл залишкових напружень, а міжфазна різниця електродного потенціалу може призводити до гальванічної корозії при перевищенні критичного порогу 0.35 В. Побудовані графіки і 3D-профілі дають змогу точно ідентифікувати зони ризику локального руйнування внаслідок перевантаження або корозії. Запропонований підхід дозволяє не лише прогнозувати механічну поведінку багатофазного покриття під впливом навантаження, але й враховувати корозійні ризики, що виникають внаслідок потенціальної несумісності матеріалів шарів. Моделювання проводилося у середовищі COMSOL Multiphysics із залученням мультифізичних модулів, що охоплюють теплопровідність, напружено-деформований стан та електрохімічні процеси. Такий інтегрований підхід дає змогу оптимізувати конструкцію покриття та технологічні параметри зміцнення з урахуванням реальних умов експлуатації, що особливо важливо для техніки подвійного призначення морської, оборонної та енергетичної. Отримані результати мають практичне значення для проєктування зміцнених конструкцій технічних систем і обладнання, зокрема корпусних елементів, вузлів підводних апаратів, турбін, гвинтових передач та інших деталей, що працюють в агресивних середовищах.

Ключові слова: *багатофазне зміцнення, лазерне гартування, електроіскрове легування, cold spray, залишкові напруження, корозійна стійкість, морське середовище, термоупруге моделювання, морський транспорт, суднові конструкції, механізми та вузли, корпус судна, експлуатація технічних систем, гальванічна пара, антикорозійні покриття, зносостійкість, COMSOL Multiphysics, структурні сталі.*

O. M. MELNYK
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0001-9228-8459

O. A. ONISHCHENKO
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Ship Handling
National University "Odesa Maritime Academy"
ORCID: 0000-0002-3766-3188

S. V. KURDIUK
Doctor of Philosophy, Senior Researcher
National University "Odesa Maritime Academy"
ORCID: 0000-0002-3165-4571

O. M. MASLII
Doctor of Pedagogical Sciences, Professor
Military Academy (Odesa)
ORCID: 0000-0003-2809-2763

V. V. OCHERETNA
Associate Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0003-4077-6711

COMPREHENSIVE MODELING OF THE EFFECT OF MULTIPHASE HARDENING ON THE WEAR AND CORROSION RESISTANCE OF STRUCTURAL STEELS IN MARINE ENVIRONMENTS

The paper presents the results of a comprehensive numerical modeling of the effect of multiphase hardening on the behavior of surface layers of structural steels in marine operation. The model combines three stages of surface treatment: laser hardening, electric spark alloying, and cold spray spraying. An approach to analyzing the thermomechanical interaction between the hardened layers was implemented, and the electrochemical activity of materials in salt water was taken into account. The simulation results showed that the thickness of the cold spray coating significantly affects the distribution of residual stresses, and the interfacial electrode potential difference can lead to galvanic corrosion when the critical threshold of 0.35 V is exceeded. The constructed graphs and 3D profiles allow us to accurately identify the risk areas of localized failure due to overload or corrosion. The proposed approach allows not only to predict the mechanical behavior of a multiphase coating under load, but also to take into account corrosion risks arising from potential incompatibility of layer materials. The modeling was performed in COMSOL Multiphysics using multiphysics modules covering thermal conductivity, stress-strain state, and electrochemical processes. This integrated approach makes it possible to optimize the design of the coating and technological parameters of hardening taking into account real operating conditions, which is especially important for dual-purpose equipment for marine, defense, and energy. The results obtained are of practical importance for the design of hardened structures of technical systems and equipment, including hull elements, submersible units, turbines, screw gears, and other parts operating in aggressive environments.

Key words: *multiphase hardening, laser hardening, electric spark alloying, cold spray, residual stresses, corrosion resistance, marine environment, thermoelastic modeling, marine transport, ship structures, mechanisms and components, ship hull, operation of technical systems, galvanic couple, anticorrosive coatings, wear resistance, COMSOL Multiphysics, structural steels.*

Вступ

Забезпечення довготривалої експлуатації вузлів та компонентів обладнання та устаткування яке експлуатується в морських умовах потребує впровадження ефективних методів захисту від інтенсивного зношування та корозії, викликаних агресивним середовищем. Солона вода, змінні температури, високий гідростатичний тиск і механічні навантаження створюють екстремальні умови для поверхневих шарів конструкційних сталей. Традиційні методи зміцнення не завжди забезпечують достатній рівень надійності, тому актуальним є використання комбінованих технологій, таких як послідовне лазерне гартування, електроіскрове легування та холодне напилення. Такі методи дозволяють створювати багатофазну мікроструктуру з локально орієнтованими властивостями, що відкриває нові можливості підвищення функціональної стабільності деталей у морському середовищі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз сучасних досліджень свідчить про активний розвиток підходів до підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та структурної стабільності сталевих деталей за рахунок використання інноваційних технологій поверхневого зміцнення. Зокрема, велика увага приділяється впливу структури, фазового складу та геометрії мікрорельєфу на зносостійкість металів і сплавів [1, 2, 5]. Комплексна оптимізація процесів плавлення, модифікації та легування сталей демонструє перспективність високомарганцевих та метастабільних сплавів [3, 9].

У роботах [4, 10, 13] представлено ефективні математичні моделі, що дозволяють описати складні термодинамічні й технологічні процеси формування зміцнених шарів, включаючи електрохімічну поведінку й оптимізацію параметрів наплавлення. Окремі дослідження [6, 11] розкривають вплив складу покриттів і захисних шарів на їхню корозійну стійкість у агресивних середовищах, зокрема у морській воді.

Питання механічних властивостей, зносостійкості та характеристик плазмових і напилювальних покриттів також висвітлено у [7, 8, 12]. Роботи [12-15] акцентують на зв'язку між зміцненням, енергоефективністю та безпекою морських суден, підкреслюючи інтеграцію інженерних рішень зміцнення у ширший контекст морської техніки та екологічного менеджменту.

Постановка проблеми

Попри наявність численних робіт з окремих методів термічного зміцнення, недостатньо вивченим залишається питання взаємодії різних зміцнюючих технологій у багатофазному покритті та їхній спільний вплив на довготривалу корозійну та зносостійку поведінку. Особливо це стосується випадків, коли на поверхню деталі послідовно наносяться зміцнюючі шари з різними механічними і електрохімічними характеристиками. У таких умовах виникають складні градієнти напружень, фазові межі та гальванічні пари, які можуть як покращити, так і дестабілізувати структуру. Тому постає задача розробки інтегрованої моделі, що дозволяє передбачити поведінку багатофазного покриття в умовах морської експлуатації.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка та реалізація математичної моделі, яка описує вплив комбінації методів лазерного, електроіскрового та холодного напилення на розподіл залишкових напружень, зносостійкість і корозійну поведінку багатофазних зміцнюючих покриттів на конструкційних сталях. Особливу увагу приділено ідентифікації зон підвищеної гальванічної активності та вивченню зв'язку між структурними параметрами шарів і їхньою довговічністю у морському середовищі.

Методика дослідження

Для досягнення поставленої мети розроблено комбіновану методику, яка поєднує аналітичне та чисельне моделювання фізико-механічних процесів у багатофазному поверхневому шарі. Було змодельовано три ключові етапи зміцнення:

– лазерне гартування як базова стадія з утворенням тонкого мартенситного шару глибиною 0.3–0.8 мм;

– електроіскрове легування (EIL) формування зміцнюючої зони з локально підвищеним вмістом тугоплавких карбідів або боридів;

– холодне газодинамічне напилення (cold spray) – створення зовнішнього антикорозійного шару товщиною 0.1–0.3 мм на основі NiCrAlY або WC-Co.

Механічна модель базується на рівняннях термоупругості з урахуванням багатошарової структури. Для опису міжфазних взаємодій та гальванічного ефекту використано метод ефективного середовища та потенціалів електрохімічної корозії.

Для оцінки розподілу залишкових напружень застосовано модифіковане рівняння:

$$\sigma_i(x) = E_i \alpha_i \int_0^t \frac{\partial T_i(x,\tau)}{\partial \tau} d\tau + \Delta\sigma_{interface}, \quad (1)$$

де i – індекс шару, $\Delta\sigma$ interface – внесок міжфазної взаємодії (різниця модулів пружності, коефіцієнтів розширення тощо).

Також проведено моделювання корозійного струму між шарами за формулою:

$$I_{corr} = \frac{E_{an} - E_{cat}}{R_{el} + R_{ct}}. \quad (2)$$

Це дозволяє визначити зони потенційної гальванічної деструкції у морській воді. Обчислення здійснювались у COMSOL Multiphysics з використанням мультифізичних зв'язків (тепло, напруження, електрохімія).

Викладення основного матеріалу дослідження

На основі чисельного моделювання розподілу залишкових напружень у багатошаровому зміцненому покритті встановлено, що кожен із шарів а саме лазерно-гартований, електроіскровий та cold spray вносить специфічну механічну і термічну відповідь на охолодження та подальшу експлуатацію. Найвищі стискуючі напруження

(~ –380 … –420 МПа) формуються у внутрішньому мартенситному шарі внаслідок інтенсивного охолодження після лазерного нагріву. Електроіскровий прошарок з тугоплавкими включеннями проявляє високу пружну жорсткість, що створює локальні напруження розтягування біля межі фаз, особливо у разі відмінностей у коефіцієнтах теплового розширення.

Моделювання показало, що при зміні товщини верхнього cold spray-покриття від 0.1 до 0.3 мм залишкові напруження в підповерхневій зоні можуть змінюватись до 30–50 МПа, що критично при втомному навантаженні. Визначено, що гальванічна пара NiCrAlY-мартенсит створює різницю потенціалів до 0.35 В у морській воді, що активізує локальну корозію, особливо в місцях порушення адгезії між шарами. Розрахунок корозійного струму за відповідною моделлю показав, що при підвищеній електропровідності середовища (35 г/л NaCl) зони контакту між шарами можуть стати точками зародження піттингової корозії.

Отримані 3D-профілі напружень і полів потенціалів чітко виявляють критичні області на глибині 0.3–0.5 мм, де одночасно присутні високі стискуючі напруження та градієнти електрохімічного потенціалу. Це вказує на необхідність оптимізації товщини та послідовності зміцнення з урахуванням не лише механічних, а й корозійних ризиків. Запропонована модель дозволяє інженерно прогнозувати функціональну надійність деталей у морському середовищі з урахуванням складної міжфазної взаємодії.

Оцінка параметричної чутливості багатофазного покриття. Одним із ключових завдань при проектуванні багатофазного покриття для експлуатації в морському середовищі є визначення оптимального балансу між механічними та електрохімічними характеристиками шарів. Залишкові стискуючі напруження, сформовані після лазерного гартування, можуть підвищувати втомну міцність деталі, однак ці напруження значною мірою залежать від параметрів наступних технологічних стадій, зокрема товщини cold spray-покриття. Крім того, міжшарові електрохімічні градієнти здатні спричинити гальванічну корозію в точках контакту фаз з різними потенціалами. Для кількісної оцінки цих ефектів проведено серію розрахункових експериментів, результати яких подано нижче у вигляді узагальнених графіків.

Вплив товщини cold spray шару на залишкові напруження

На рис. 1 наведено залежність залишкових стискуючих напружень у мартенситному шарі від товщини зовнішнього cold spray-покриття. Видно, що збільшення товщини з 0.1 до 0.3 мм викликає поступове зменшення залишкових напружень з –380 до –350 МПа. Це пов’язано з демпфуючим ефектом холодного шару, який частково компенсує термоупругі деформації, викликані попереднім лазерним нагрівом.

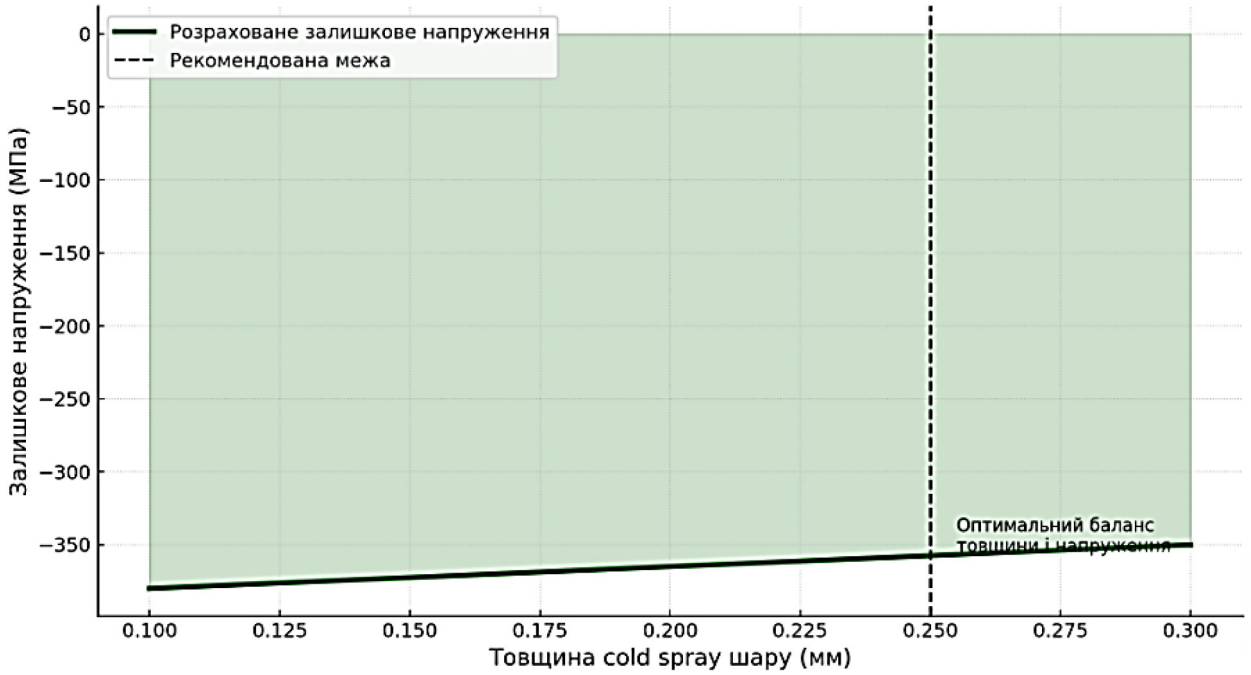


Рис. 1. Вплив товщини покриття на залишкові напруження у мартенситному підшарі

На графіку також виділено рекомендовану межу 0.25 мм, при якій досягається оптимальний компроміс між жорсткістю, антикорозійною стійкістю та допустимим рівнем стискуючих напружень. Товщина понад 0.27 мм призводить до надмірного зниження напружень і потенційного погіршення втомної міцності через втрату ефекту зміцнення.

Вплив міжфазної різниці потенціалів на гальванічний струм

На рис. 2 показано, як різниця потенціалів між матеріалами шарів впливає на гальванічний струм у системі багатофазного покриття. Із зростанням потенціалу понад 0.35 В спостерігається різке збільшення струму до значень, які перевищують 2 мА/см^2, це вважається порогом активного корозійного руйнування.

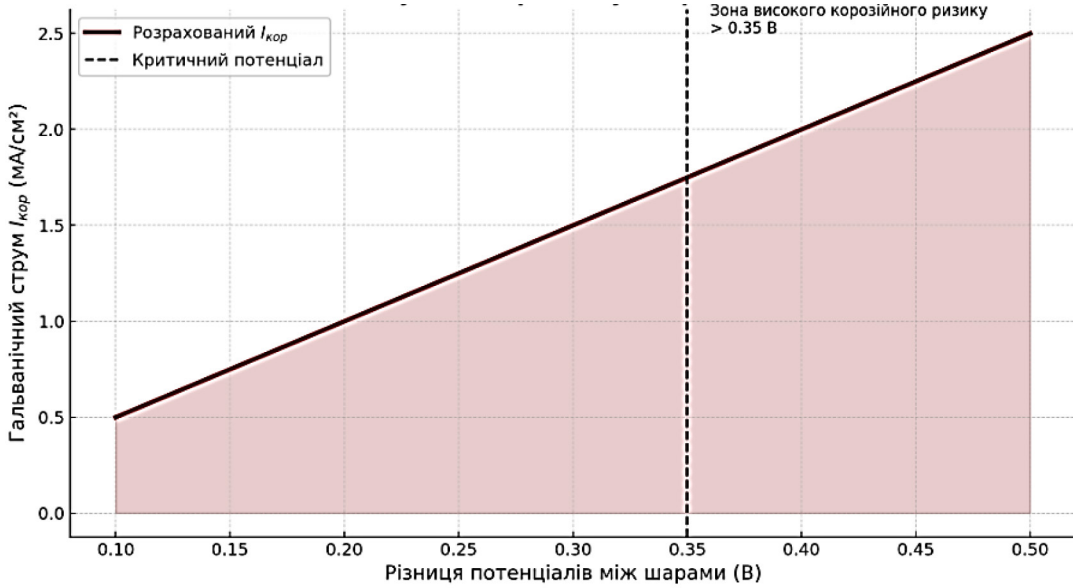


Рис. 2. Вплив різниці потенціалів на гальванічну активність у багатофазному покритті

Цей результат свідчить про те, що підбір матеріалів cold spray-шару повинен враховувати не лише механічну сумісність, а й електрохімічну нейтральність щодо основи. У разі використання високопотенціальних покриттів (NiCr, WC-Co), рекомендовано застосовувати перехідні буферні шари або бар'єрні анодні прошарки для запобігання локальній піттинговій корозії.

Проведене параметричне моделювання дозволило виявити критичні тенденції формування залишкових напружень і гальванічного струму в багатофазних структурах. Зокрема, встановлено, що збільшення товщини cold spray-покриття понад 0.25 мм призводить до значного зменшення стискуючих напружень у мартенситному шарі, що може послабити ефект зміцнення. Водночас, при перевищенні міжшарової різниці потенціалів 0.35 В, корозійна активність суттєво зростає, створюючи ризик локального руйнування. Таким чином, для забезпечення довговічності багатошарового зміцнення необхідно ретельно обирати не лише матеріали, а й геометричні параметри шарів, з урахуванням їхньої термомеханічної та електрохімічної взаємодії.

Висновки

У роботі здійснено комплексне моделювання багатофазного поверхневого зміцнення конструкційних сталей для умов експлуатації в агресивному морському середовищі. Розроблено математичну модель, що охоплює послідовне застосування лазерного гартування, електроіскрового легування та cold spray-покриттів з урахуванням термомеханічної та електрохімічної взаємодії між шарами. Особливу увагу приділено розподілу залишкових напружень у мартенситному підшарі, динаміці їх формування в залежності від режимів охолодження та геометричних характеристик верхнього шару. Було виявлено, що збільшення товщини cold spray-покриття викликає зменшення стискуючих напружень у підлеглому шарі, що позитивно впливає на стабільність структури, але може знижувати втомну міцність.

Паралельно проведено оцінку ризиків гальванічної корозії при контакті матеріалів з різними електродними потенціалами. Встановлено, що перевищення порогу в 0.35 В між шарами призводить до суттєвого зростання гальванічного струму, що може спричинити локальні пошкодження структури навіть при високій загальній твердості системи. Це підкреслює важливість оптимального підбору матеріалів з урахуванням не лише механічної сумісності, а й електрохімічної інертності.

Результати дослідження можуть бути використані для проектування зміцнених елементів корпусних конструкцій, підводного обладнання, турбін та рухомих вузлів морських машин, де поєднуються високі вимоги до зносостійкості, втомної міцності та корозійної стабільності. Запропонований підхід відкриває можливості для інтеграції багатофізичного моделювання у практику інженерного розрахунку технологій поверхневого зміцнення нового покоління.

Список використаної літератури

1. Глушкова Д. Б., Багров В. А., Волчук В. Дослідження впливу структури та фазового складу на зносостійкість економнолегованих метастабільних та вторинногвердіючих сталей // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2023. № 15. С. 50–58. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.50.954

2. Киричок П., Паліух Д. Дослідження впливу геометрії профілю та мікрорельєфного зміцнення на зносостійкість фальцювальних пластин // Технологія і техніка друкарства. 2024. № 1(83). С. 4–17. DOI: 10.20535/2077-7264.1(83).2024.305494

3. Shypytsyn S., Fedorov H., Kirchu I., Lykhovey D., Stepanova T. Increasing the physical-mechanical and operational properties of high manganese steels by improving the technological processes of their melting, micro-alloying and modification // Casting Processes. 2024. № 155. С. 14–28. DOI: 10.15407/plit2024.01.014

4. Тріщук, Руслан. (2019). Алгоритм керування комплексним технологічним процесом зміцнення циліндричних сталевих поверхонь деталей поліграфічного обладнання. Технологія і техніка друкарства. 15–28. 10.20535/2077-7264.2(64).2019.184574

5. Зусін А. Вплив режимів термічної обробки на структуру та зносостійкість наплавленого металу розробленими порошковими дротами з азотом // Наука та виробництво. 2024. С. 67–76. DOI: 10.31498/2522-9990272024303160

6. Чаудхурі Н., Юсофф Ш., Мустафа М., Лах Н. Дослідження впливу складу модифікованого лігніно-епоксидного покриття на корозійну стійкість з використанням методу поверхні відгуку // Journal of Chemistry and Technologies. 2024. Т. 31. С. 844–854. DOI: 10.15421/jchemtech.v31i4.290101

7. Мурашов А. П., Вігілінська Н. В., Грищенко О. М., Ющенко А. О., Горбань В. Ф. Investigation of the Mechanical Properties and Wear Resistance of Intermetallic FeAl-Based Plasma Sprayed Coatings // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. № 163. С. 91–96. DOI: 10.31649/1997-9266-2022-163-4-91-96

8. Савонов, Юрій & Капустян, Олексій & Парахнєвич, Євген & Єршов, Анатолій. (2024). Порівняльна оцінка електродних матеріалів для зварювання хромонікелевих сталей. Наука та виробництво. 64–70. 10.31498/2522-9990282024318363

9. G R, Raghav & Krishnan, D & Nagarajan, K. & Chandran, Vidya & Rajan, Suraj & Ramanujan, Sujith & Dhanesh, S & Anoop, M. (2022). Investigation of Mechanical, Wear, and Corrosion Properties of Al–BN–SiC–RHA Hybrid Composites Synthesized Through Powder Metallurgy Process. METALLOFIZIKA I NOVEISHIE TEKHNOLOGII. 44. 111–126. 10.15407/mfint.44.01.0111

10. Кругляк І. В., Середа Д. Б., Палехова І. В., Білозір І. В., Проломов А. А., Кіфорук Д. М., Стасевич О. О., Кривко Р. Г. Моделювання та оптимізація отримання покриттів, легованих хромом з використанням КПС // Математичне моделювання. 2022. № 2(47). С. 98–104. DOI: 10.31319/2519-8106.2(47)2022.268407

11. Погребова І., Янцевич К. Корозійна стійкість хромосиліцидних покриттів на сталі 45 у різних агресивних середовищах // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. № 2. С. 71–75. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2023.2.9

12. Мельник О. М., Булгаков М. П., Терновський В. Б., Заяць С. В. Моделювання термодинамічних і гідродинамічних факторів впливу на енергоефективність морських суден // Наука і техніка сьогодні. 2025. Т. 3, № 44. С. 1025–1035. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-1025-1035

13. Onishchenko, O. A., Melnyk, O. M., Kurdiuk, S. V., Maslii, O. M., & Maulevych, V. O. (2025). Technological approaches and practical solutions for surface hardening of structural steels. Наука і техніка сьогодні, 3(44), 893–906. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-892-906

14. Мельник О. М. Оцінка впливу енергоефективності на безпеку експлуатації судна // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. 2023. № 2(39). С. 76–81. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11

15. Логінов О. В., Мельник О. М., Волошин А. О., Кучеренко В. Ю., Волошин Д. А., Варлан Т. Є. Аналіз викидів та стратегії оптимізації екологічних аспектів роботи судна // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 35(74), № 5. С. 202–494. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/15

References

1. Hlushkova, D. B., Bagrov, V. A., & Volchuk, V. (2023). Investigation of the influence of structure and phase composition on the wear resistance of economically alloyed metastable and secondary-hardened steels. *Bulletin of the Pryazovskyi State Technical University. Series: Technical Sciences*, (15), 50–58. https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.50.954

2. Kyrychok, P., & Paliukh, D. (2024). Investigation of the influence of profile geometry and micro-relief strengthening on the wear resistance of folding plates. *Printing Technology and Technique*, 1(83), 4–17. https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(83).2024.305494

3. Shypytsyn, S., Fedorov, H., Kirchu, I., Lykhovey, D., & Stepanova, T. (2024). Increasing the physical-mechanical and operational properties of high manganese steels by improving the technological processes of their melting, micro-alloying and modification. *Casting Processes*, (155), 14–28. https://doi.org/10.15407/plit2024.01.014

4. Trishchuk, R. (2019). Algorithm for controlling the complex technological process of strengthening cylindrical steel surfaces of printing equipment parts. *Printing Technology and Technique*, 15–28. https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(64).2019.184574

5. Zusin, A. (2024). Influence of heat treatment modes on the structure and wear resistance of overlay metal developed with nitrogen powder wires. *Science and Production*, 67–76. https://doi.org/10.31498/2522-9990272024303160

6. Chaudhuri, N., Yusoff, S., Mustafa, M., & Lah, N. D. (2024). Study of the effect of modified lignin-epoxy coating composition on corrosion resistance using response surface methodology. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31, 844–854. https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i4.290101

7. Murashov, A. P., Vigilinska, N. V., Hryshchenko, O. M., Yushchenko, A. O., & Horban, V. F. (2022). Investigation of the Mechanical Properties and Wear Resistance of Intermetallic FeAl-Based Plasma Sprayed Coatings. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 163, 91–96. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-163-4-91-96

8. Savonov, Y., Kapustian, O., Parakhnevych, Y., & Yershov, A. (2024). Comparative evaluation of electrode materials for welding chromium-nickel steels. *Science and Production*, 64–70. https://doi.org/10.31498/2522-9990282024318363

9. Raghav, G. R., Krishnan, D., Nagarajan, K., Chandran, V., Rajan, S., Ramanujan, S., Dhanesh, S., & Anoop, M. (2022). Investigation of Mechanical, Wear, and Corrosion Properties of Al–BN–SiC–RHA Hybrid Composites Synthesized Through Powder Metallurgy Process. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 44, 111–126. https://doi.org/10.15407/mfint.44.01.0111

10. Kruhliak, I. V., Sereda, D. B., Palekhova, I. V., Bilozir, I. V., Prolomov, A. A., Kiforuk, D. M., Stasevych, O. O., & Kryvko, R. H. (2022). Modeling and optimization of obtaining chromium-alloyed coatings using CPS. *Mathematical Modeling*, 2(47), 98–104. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(47)2022.268407

11. Pohrebova, I., & Yantsevych, K. (2023). Corrosion resistance of chromium-silicide coatings on steel 45 in various aggressive environments. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 2, 71–75. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.9

12. Melnyk, O. M., Buhlakov, M. P., Ternovskyi, V. B., & Zaiats, S. V. (2025). Modeling of thermodynamic and hydrodynamic factors affecting the energy efficiency of marine vessels. *Science and Technology Today*, 3(44), 1025–1035. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-1025-1035

13. Onishchenko, O. A., Melnyk, O. M., Kurdiuk, S. V., Maslii, O. M., & Maulevych, V. O. (2025). Technological approaches and practical solutions for surface hardening of structural steels. *Science and Technology Today*, 3(44), 893–906. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-892-906

14. Melnyk, O. M. (2023). Assessment of the impact of energy efficiency on ship operation safety. *Podilskyi Bulletin: Agriculture, Technology, Economics*, 2(39), 76–81. https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11

15. Lohinov, O. V., Melnyk, O. M., Voloshyn, A. O., Kucherenko, V. Y., Voloshyn, D. A., & Varlan, T. Y. (2024). Analysis of emissions and strategies for optimizing the ecological aspects of ship operation. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 35(74)(5), 202–494. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/15

UDC 504.064:656.61 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.21

O. M. MELNYK
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at Navigation and Maritime Safety Department
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0001-9228-8459

M. P. BULGAKOV
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Navigation and Maritime Safety Department
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-7172-8678

V. YU. KUCHERENKO
Senior Lecturer at the Navigation and Maritime Safety Department
Odesa National Maritime University
ORCID: 0009-0008-4906-9726

STATE AND DYNAMICS OF ENVIRONMENTAL IMPACT FROM SHIPPING IN THE BLACK SEA REGION: TRENDS, CHALLENGES, AND TECHNOLOGICAL RESPONSES

The Black Sea region is one of the key transportation arteries between Europe, the Caucasus and Asia, with more than 140 million tons of various cargoes passing through it annually. Therefore, the intensification of shipping combined with the lack of strict environmental regulations, such as emission control zones (ECAs), is creating growing pressure on the marine environment. The article provides an overview of quantitative indicators of the impact of maritime transport on the Black Sea ecosystems with a focus on CO_2, NO_x, SO_x *emissions, noise pollution, biodiversity loss, and local environmental hazards. It also highlights current research in the field of ecology, logistics, energy efficiency, and the latest technologies that form the basis for the development of a long-term regional policy, taking into account the goals of the European Green Deal and the Convention on the Protection of the Black Sea against Pollution. The most vulnerable areas, including the Danube Delta, the Odesa coast, and the Bosphorus Strait, are identified. A comparison with the environmental standards of the Baltic Sea is made, which allows to identify regulatory gaps. A number of technological solutions are proposed, including cold ironing, LNG, scrubbers, and digital MRV systems. Particular attention is paid to policy initiatives: the creation of a pilot SECA zone, unification of port electrification policies, introduction of mandatory emissions monitoring, and creation of the Black Sea Green Shipping Fund. Recommendations for the implementation of a comprehensive strategy for environmental safety of navigation in the Black Sea based on the principles of sustainable development and interstate cooperation are presented. An analytical comparison of the environmental situation in the Black Sea with other sea basins where successful emission control and fleet modernization practices have already been implemented is made. Based on this comparison, the author substantiates the feasibility of adapting such instruments in the Black Sea context, taking into account the geopolitical complexity of the region.*

Key words: *shipping, environmental safety, maritime transportation, MARPOL Annex VI,* CO_2, NO_x, SO_x *emissions, SECA zone, IMO, port electrification, cold ironing, ecosystem risks, biodiversity, noise pollution, ballast water, decarbonization of the fleet, LNG, scrubber technologies, energy efficiency, MRV system, green shipping, environmental policy, transnational governance, sustainable development.*

О. М. МЕЛЬНИК
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0001-9228-8459

М. П. БУЛГАКОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0002-7172-8678

В. Ю. КУЧЕРЕНКО
старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0009-0008-4906-9726

СТАН ТА ДИНАМІКА ЕКОЛОГІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД СУДНОПЛАВСТВА В ЧОРНОМОРСЬКОМУ РЕГІОНІ: ТЕНДЕНЦІЇ, ВИКЛИКИ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ВІДПОВІДІ

Чорноморський регіон є однією з ключових транспортних артерій між Європою, Кавказом та Азією, через яку щорічно проходить понад 140 млн тонн різних вантажів. Тому інтенсифікація судноплавства в поєднанні з відсутністю жорстких екологічних регуляцій, таких як зони контролю викидів (SECA), створює зростаючий тиск на морське середовище. У статті представлено огляд кількісних показників впливу морського транспорту на екосистеми Чорного моря з акцентом на обсяги викидів CO_2, NO_x, SO_x, *шумове забруднення, втрати біорізноманіття та локальні екологічні небезпеки. Також висвітлено сучасні дослідження в галузі екології, логістики, енергоефективності та новітніх технологій, що формують підґрунтя для розробки довгострокової регіональної політики з урахуванням цілей Європейського зеленого курсу та Конвенції із захисту Чорного моря від забруднення. Визначено найбільш вразливі зони, зокрема дельту Дунаю, узбережжя Одеси та Босфорську протоку. Проведено порівняння з екологічними стандартами Балтійського моря, що дозволяє окреслити нормативно-регуляторні прогалини. Запропоновано низку технологічних рішень, серед яких cold ironing, впровадження LNG, scrubbers та цифрові MRV-системи. Окрема увага приділена політичним ініціативам: створенню пілотної SECA-зони, уніфікації політик електрифікації портів, запровадженню обов'язкового моніторингу викидів та створенню фонду «Зелене судноплавство Чорного моря». Подано рекомендації щодо реалізації комплексної стратегії екологічної безпеки судноплавства в Чорному морі на основі принципів стійкого розвитку та міждержавної співпраці. Проведено аналітичне зіставлення екологічної ситуації в Чорному морі з іншими морськими басейнами, де вже впроваджено успішні практики контролю за викидами та модернізації флоту. На основі цього порівняння обґрунтовано доцільність адаптації подібних інструментів у чорноморському контексті з урахуванням геополітичної складності регіону.*

Ключові слова: *судноплавство, екологічна безпека, морські перевезення, MARPOL Annex VI, викиди* CO_2, NO_x, SO_x, *зона SECA, IMO, портова електрифікація, cold ironing, екосистемні ризики, біорізноманіття, шумове забруднення, баластні води, декарбонізація флоту, LNG, scrubber-технології, енергоефективність, MRV-система, зелене судноплавство, екологічна політика, транснаціональне управління, стійкий розвиток.*

Problem statement

The Black Sea region, a key transportation corridor between Europe, the Caucasus, and Central Asia, is experiencing a steady increase in shipping intensity. At the same time, the environmental impacts of this activity remain poorly controlled due to the lack of strictly regulated areas (e.g., SECA), insufficient coordination between littoral states, and fragmented environmental monitoring systems. Increased emissions of CO_2, NO_x, and SO_x, as well as localized forms of pollution (oil emissions, ballast water, noise) pose a systemic risk to unique marine ecosystems, particularly in areas of transboundary vulnerability (the Danube Delta, the Bosphorus and Kerch Straits). Currently, there is no integrated assessment of the environmental impact of shipping in the Black Sea, taking into account quantitative indicators, regulatory context, and technological practices.

Literature review

The analysis of sources allows us to identify several key areas of research and international reports that form the context for assessing the environmental impact of shipping in the Black Sea. The data from the reports of international organizations – EMSA, IMO, UNECE, UNCTAD, UNEP – reflect the current volumes of cargo flows, levels of CO_2, NO_x, SO_x emissions, as well as regulatory gaps compared to the SECA zones of other seas [1–7]. These documents provide a quantitative basis for building environmental scenarios and assessing the state of pollution.

The peer-reviewed articles [8–14] cover current trends in alternative fuels, decarbonization of maritime transport, emissions from 1970 to 2021, and prospects for the global transition to hydrogen and biofuels. Studies [15–20] focus on the national and regional levels, covering energy efficiency, the impact of new technologies, environmental logistics, and regulatory management.

This study aims to provide a comprehensive overview of the current state and dynamics of the environmental load from maritime transport in the Black Sea region, focusing on quantitative data, international regulations, technical innovations, and environmental management practices. Particular attention is paid to analyzing emissions, comparing with other sea basins (Baltic, English Channel), identifying vulnerable areas, and formulating proposals for implementing a regional sustainable shipping policy.

Main research materials

The Black Sea is a strategically important transportation artery for Europe and Asia, with more than 140 million tons of cargo passing through it annually, including oil, grains, containers, and industrial products [1, 2]. The region's key ports – Odesa, Constanta, Istanbul, Varna, and Batumi – function as transshipment centers and logistics hubs for

international trade. The growing shipping intensity, especially in the last decade, has created high environmental pressure on coastal and open waters.

According to the European Maritime Safety Agency (EMSA), in 2022 alone, CO_2 emissions from shipping in the Black Sea exceeded 10 million tons, comparable to some EU countries' national emissions [3]. Additionally, SO_x and NO_x emissions cause water acidification, eutrophication, reduced oxygen levels, and threats to biodiversity. The following areas are considered particularly vulnerable: the Danube Delta, Ukrainian coast near Odesa, Bosphorus Strait and the waters of Istanbul and Bulgarian coast (ports of Varna and Burgas)

The UNEP and the Black Sea Commission observe a consistent trend of exceeding permissible concentrations of oil products and heavy metals and increased local algal blooms near port areas. At the same time, unlike the Baltic Sea or the English Channel, the Black Sea region is not yet designated as ECA/SECA zones following MARPOL Annex VI, which permits the use of high-sulfur fuels without additional restrictions [4].

The increasing number of tankers, bulk carriers, and Ro-Ro vessels worsens the situation. In 2022, over 42,000 vessels passed through the Bosphorus Strait alone, many of which were potential sources of pollution [5]. This heightens the need for stricter regulations and the implementation of modern eco-technologies, such as cold ironing, LNG propulsion, scrubbers, and port electrification.

Trends: development of shipping and environmental impact in the Black Sea region

The last decade has demonstrated a clear upward trend in cargo turnover and ship calls to Black Sea ports, especially in Ukraine, Romania, Bulgaria, and Turkey. According to EMSA [1], in 2022, over 85,000 ship calls were recorded at Black Sea ports, the majority being tankers (30 %), bulk carriers (25 %), Ro-Ro ships (15 %), and container ships (12 %). The highest concentration is noted in the ports of Istanbul, Constanta, and Odesa.

The fuel mix is also changing. After the introduction of the global sulfur content limit of 0.5 % in fuels (from 2020, MARPOL Annex VI), the vast majority of the fleet switched to VLSFO. However, the use of LNG as a fuel is still limited, in particular due to the lack of appropriate infrastructure in the region. Nevertheless, the port of Constanta has already announced plans to build an LNG terminal by 2026 [2].

At the same time, there is a gradual introduction of cold ironing technologies that reduce emissions in ports by connecting the ship to the shore power grid. Pilot projects are being implemented in Burgas, Varna, and Constanta with the support of the EU [3].

The introduction of digital environmental logbook systems that collect data on fuel consumption, emissions tracking, and route optimization is also becoming widespread. These data are reported through the EMSA THETIS-MRV system and used to compile annual analytical reviews [4].

Despite these changes, the Black Sea remains a region with low environmental regulation compared to the Baltic and North Seas, both of which have long been designated as ECA/SECA zones. This creates a «regulatory gap» that hinders the introduction of cleaner technologies in the area [5]. Meanwhile, after 2025, the EU is expected to increase pressure for the expansion of eco-zones, which may alter the environmental policies of member states.

One key indicator of the intensity of environmental burdens in the region is the fleet's composition that regularly visits Black Sea ports. According to EMSA and Black Sea MoU data, six main types of vessels form the backbone of regional shipping. Tankers and bulk carriers account for the largest traffic share due to their transportation of energy, grain, and raw materials. These vessels are energy-intensive and have the most significant carbon footprint per cargo unit (Table 1).

Table 1

Fleet Composition in the Black Sea Region (2022)

Ship Type	Port Calls (2022)	Share (%)
Tankers	25,500	30 %
Bulk Carriers	21,200	25 %
Ro-Ro	12,700	15 %
Container Ships	10,200	12 %
General Cargo	8,500	10 %
Others	5,900	8 %

As can be observed from the table, tankers account for more than a third of all ship calls (30 %), which is critical from an environmental perspective due to the potential for oil spills. Bulk carriers (25 %) and Ro-Ro vessels (15 %) also play a significant role, especially in the context of intensive short-sea traffic between countries in the region. Container and general cargo ships (22 % together) indicate active trade and intensive logistics. Such a fleet structure requires the introduction of differentiated environmental approaches adapted to the type of ship and the nature of its route. This is especially important given the need to introduce regional regulations such as ECA/SECA to reduce the impact of the most polluting ships.

The graph in Figure 1 shows the dynamics of the number of ship calls to the ports of the Black Sea countries during 2018–2022. The largest load is consistently recorded in Turkey, with a gradual increase. Romania shows a steady growth,

while Ukraine has a decline in 2020–2021 with a partial recovery in 2022. This picture makes it possible to assess the geographical distribution of environmental pressure and set environmental policy priorities for each country.

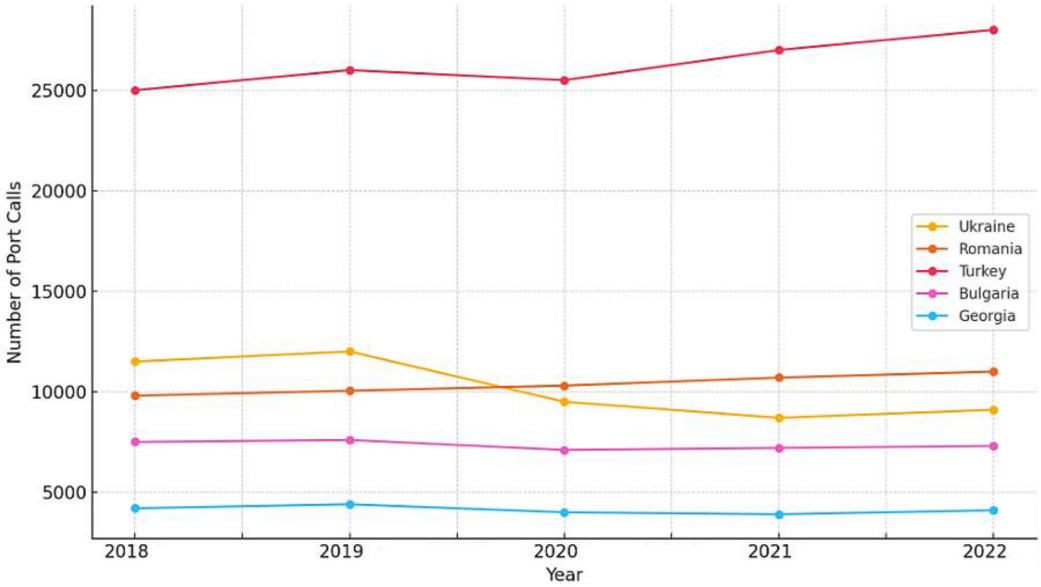


Fig. 1. Port Calls in the Black Sea by Country (2018–2022)

Challenges: environmental risks and regulatory gaps

Despite the economic importance of shipping, the Black Sea region faces a number of acute environmental challenges, which are significantly exacerbated by an insufficient regulatory framework and weak integration into global environmental regimes.

One of the key risks is chemical pollution. According to the Black Sea Commission [1], the coastal zones of Odesa, Varna, and Burgas have recorded a 3–5-fold exceedance of the maximum permissible concentrations of oil products. Particularly dangerous are discharges from ballast water, which contain residual fuel oil, bacteria, and heavy metals and can lead to the introduction of invasive species.

Another challenge is the underwater noise generated by large ships (especially bulk carriers and tankers). According to a study by EMSA [2], the noise intensity in the areas near the Bosphorus and the Danube Delta far exceeds environmentally safe levels, affecting the vital activity of cetaceans and fish.

A separate problem is the lack of SECA/ECA zone status. All Black Sea coastal states currently allow the use of fuels with a high sulfur content (up to 0.5 %), which, under conditions of heavy traffic, leads to the accumulation of sulfur oxides (SO_x) and nitrogen oxides (NO_x), which cause acidification of the marine environment and local eutrophication [3].

There are also periodic leaks of oil products from ships while docking in ports or maneuvering, especially in conditions of outdated port infrastructure. These accidents are not always subject to mandatory reporting, making monitoring and preventing recurrence difficult.

In addition, the ecosystems of the Danube Delta, the northwestern Black Sea shelf, and the adjacent lagoons are already in a state of critical overload due to the cumulative impact of maritime transport, agricultural runoff, and industrial pollution [4].

Technological answers: the transition to cleaner shipping

In response to the growing environmental burden in the Black Sea, recent years have seen the introduction of a number of technological solutions aimed at reducing emissions, improving environmental monitoring, and increasing energy efficiency.

One of the leading areas is cold ironing (shore power), which involves connecting ships to the shore power grid while they are docked in port. This practice eliminates the need for ship diesel engines and reduces local emissions by up to 90 % of CO_2 and 95 % of SO_x/NO_x. The ports of Constanta, Burgas, and Varna have already implemented pilot projects with support from the European Union's CEF program [1].

There is a growing interest in using liquefied natural gas (LNG) in marine energy. Although the infrastructure in the Black Sea is still being developed, projects in Romania and Turkey show the prospects for LNG bunker terminals by 2026 [2]. LNG can reduce SO_x emissions to almost zero and NO_x emissions by 80 % compared to HFO.

Another solution is the implementation of scrubber-type treatment plants, which enable the continued use of heavy fuel while treating the exhaust. According to EMSA, over 12 % of ships operating in the region are already equipped with scrubbers [3].

Digital solutions, such as automated reporting systems (MRV), satellite monitoring (CleanSeaNet), and tools for optimizing ship routes and speed, are also being intensively developed. They not only increase transparency but also create a basis for future integration with market-based carbon regulation mechanisms (EU ETS from 2024) [4].

Cooperation with the Baltic Sea, which has long functioned as an SECA/ECA zone, also plays an important role. The experience of switching to clean fuels, implementing ballast systems, and preparing port infrastructure serves as a technological model for the Black Sea.

Recommendations for environmental safety policy in the Black Sea

Five strategic directions of regional environmental policy have been formulated based on a comprehensive analysis of the environmental situation and trends in maritime transportation in the Black Sea region. Their implementation will significantly reduce the level of marine pollution and increase the environmental sustainability of shipping.

1. Establishment of a Pilot SECA Zone (2025–2027).

The most appropriate approach is to introduce a Sulphur Emission Control Area (SECA) in the northwestern sector of the Black Sea, specifically in the coastal waters of Ukraine and Romania. This would entail a concerted initiative at the International Maritime Organization (IMO) level, the European Maritime Safety Agency (EMSA), and national environmental services. The pilot zone will enable testing new fuel quality and emission standards without the need for immediate extension to the entire basin.

2. Unification of Port Electrification.

Policies In the context of combating local emissions of CO_2, SO_x, and NO_x, it is vital to develop cold ironing (shore power) infrastructure in the region's key ports. Constanta, Varna, Istanbul, and Odesa ports may become the first participants in a unified regional program that includes standardized technical specifications for connections, tax benefits for shipowners, and subsidy mechanisms from government agencies.

3. Mandatory Emissions Reporting (by 2026).

Introducing a system for monitoring, reporting, and verifying emissions (MRV) in the Black Sea will enhance the transparency of maritime transport and provide a reliable database for decision-making. All vessels calling at the region's ports should be required to report real fuel consumption, vessel routes, and CO_2, NO_x, and SO_x emissions.

4. Establishment of the Black Sea Green Shipping Fund.

This initiative envisions the creation of a special fund that would gather resources from EU programs (Green Deal, CEF), international environmental funds, and national budgets to finance the "green" renewal of the fleet. Low-interest grants or loans could be utilized for installing scrubbers, converting ships to LNG or hybrid power systems, and reconstructing port facilities.

5. Conclusion of Bilateral Environmental Agreements (BETAs).

To improve the effectiveness of control over transboundary pollution zones, it is recommended that neighboring states establish bilateral agreements. These agreements can regulate the environmental regime in the most sensitive areas, such as the Danube Delta, the Bosphorus, and the Kerch Straits. This would allow for the coordinated implementation of ship speed limits, ballast water requirements, noise control, and joint monitoring.

To improve the effectiveness of environmental regulation of maritime transport in the Black Sea, a package of policy initiatives aimed at reducing shipping's harmful impact on the marine environment is proposed. Below is an overview of the key steps that can be implemented in an interstate format (Table 2).

These measures will help reduce pollution, increase monitoring transparency, and ensure that shipping is adapted to modern environmental challenges. This strategy also brings the Black Sea region closer to the standards of sustainable maritime development adopted in the Baltic, North Sea, and other IMO eco-zones.

Table 2

Policy Measures for Black Sea Maritime Sustainability

No.	Policy Initiative	Description
1	Establishment of a Pilot SECA Zone (2025–2027)	Designate the NW Black Sea (Ukraine and Romania) as a SECA with phased implementation via IMO, EMSA, and national authorities
2	Harmonization of Port Electrification Policies	Implement shore power (cold ironing) in key ports with standardized interfaces and state/EU co-financing
3	Mandatory Emissions Reporting (MRV System)	Deploy a regional MRV platform requiring vessels to report fuel use and emissions (CO_2, NO_x, SO_x)
4	Black Sea Green Shipping Fund	Launch a financial instrument to subsidize LNG retrofits, scrubbers, and port environmental upgrades
5	Bilateral Environmental Traffic Agreements (BETAs)	Foster state-to-state agreements for managing pollution in shared zones (e.g., Bosporus, Danube Delta, Kerch Strait)

Conclusions

The study demonstrated that the Black Sea region continues to be a crucial center for international shipping while also being an environmentally vulnerable maritime system. The increase in cargo flows through the ports of Turkey, Romania, and Ukraine is accompanied by a rise in negative environmental impacts, primarily due to greenhouse gas emissions, noise, and oil pollution. Tankers, bulk carriers, and Ro-Ro vessels constitute the majority of the fleet and are the primary sources of significant stress on the marine environment. At the same time, the lack of officially established emission control zones in the region, such as SECA or ECA, considerably undermines the potential for effective environmental regulation.

Despite the challenges, the region has already started implementing some technological solutions, such as electrifying berths (cold ironing), introducing scrubbers, using alternative fuels (LNG), and launching digital platforms for emissions monitoring (MRV). The ports of Constanta, Burgas, and Varna demonstrate the potential to adapt to EU environmental standards.

A coherent regional policy needs to be developed to achieve environmentally safe and economically sustainable shipping in the Black Sea. Priority measures include the creation of a pilot SECA zone, unification of port electrification programs, introduction of mandatory emissions reporting, formation of a trust fund to support the «green» fleet, and conclusion of cross-border environmental agreements. A coordinated strategy involving the littoral countries, the EU, and the IMO is the key to preserving the ecological balance of the Black Sea in the face of growing logistical pressures.

Bibliography

1. European Maritime Safety Agency (EMSA). Thetis-MRV Annual Report 2022 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.emsa.europa.eu

2. International Maritime Organization (IMO). Fourth Greenhouse Gas Study 2020 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.imo.org

3. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Review of Maritime Transport in the Black Sea. 2021 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://digitallibrary.un.org

4. International Maritime Organization (IMO). MARPOL Annex VI, Consolidated Edition 2022 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.imo.org

5. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). Maritime Transport Review 2023 (Black Sea focus) [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://unctad.org

6. United Nations Environment Programme (UNEP), Black Sea Commission. Black Sea State of Environment Report 2021 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.unep.org

7. European Maritime Safety Agency (EMSA), European Environment Agency (EEA). European Maritime Transport Environmental Report (EMTER) 2021 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.emsa.europa.eu

8. Ahmed, S., Li, T., Zhou, X. Y., Yi, P., Chen, R. Quantifying the environmental footprints of biofuels for sustainable passenger ship operations // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024. Vol. 207. Article 114919. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114919

9. Hamed, M. та ін. Impacts of climate change and black sand on Red Sea, Egypt. A comprehensive review // Regional Studies in Marine Science. 2024. Vol. 78. Article 103787. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103787

10. Li, Z., Wang, K., Liang, H. та ін. Marine alternative fuels for shipping decarbonization: Technologies, applications and challenges // Energy Conversion and Management. 2025. Vol. 329. Article 119641. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119641

11. Wang, X. та ін. Global shipping emissions from 1970 to 2021: Structural and spatial change driven by trade dynamics // One Earth. 2025. Article 101243. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101243

12. Abraham, E. J. та ін. Large-scale shipping of low-carbon fuels and carbon dioxide towards decarbonized energy systems: Perspectives and challenges // International Journal of Hydrogen Energy. 2024. Vol. 63. P. 217-230. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.140

13. Robin, R. та ін. Integrated Coastal Zone Management practices and cumulative environmental impacts: The case of Vembanad Lake // Ecohydrology of Kerala. 2024. P. 257–293. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95606-2.00002-4

14. Merrie, A. та ін. An ocean of surprises – Trends in human use, unexpected dynamics and governance challenges in areas beyond national jurisdiction // Global Environmental Change. 2014. Vol. 27. P. 19–31. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.012

15. Kovtun, T., Kovtun, D. Environmental product as a result of greening logistics activities // Transport Development. 2021. № 3(10). P. 19-29. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2021.3-10.02

16. Danylyan, A., Maslov, I., Tiron-Vorobiova, N. Ecology and savings of diesel fuel in the scientific review of new technologies of its combustion // Transport Development. 2021. № 2(7). P. 86–97. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2020.2-7.08

17. Онищенко, С. П., Мельник, О. М., Волошин, А. О., Калініченко, Є. В., Заяц, С. В. Огляд основних механізмів управління енергоефективністю та контролю за викидами з морських суден // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2021. № 197. С. 121–129. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248314

18. Melnyk, O., Shcherbina, O., Mykhailova, I., Obnyavko, T., Korobko, T. Focused research on technological innovations in shipping industry: review and prospects // Transport Development. 2023. № 1(16). P. 164–174. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.13

19. Мельник, О. М. та ін. Концепція та перспективи використання водневого палива на морському транспорті // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2023. № 203. С. 96–105.

20. Мельник, О. М. Оцінка впливу енергоефективності на безпеку експлуатації судна // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. 2023. № 2(39). С. 76–81. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11

References

1. European Maritime Safety Agency (EMSA) (2022) *Thetis-MRV Annual Report 2022*. [Electronic resource]. Available at: https://www.emsa.europa.eu

2. International Maritime Organization (IMO) (2020) *Fourth Greenhouse Gas Study 2020*. [Electronic resource]. Available at: https://www.imo.org

3. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) (2021) *Review of Maritime Transport in the Black Sea*. [Electronic resource]. Available at: https://digitallibrary.un.org

4. International Maritime Organization (IMO) (2022) *MARPOL Annex VI, Consolidated Edition 2022*. [Electronic resource]. Available at: https://www.imo.org

5. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (2023) *Maritime Transport Review 2023 (Black Sea focus)*. [Electronic resource]. Available at: https://unctad.org

6. United Nations Environment Programme (UNEP), Black Sea Commission (2021) *Black Sea State of Environment Report 2021*. [Electronic resource]. Available at: https://www.unep.org

7. European Maritime Safety Agency (EMSA), European Environment Agency (EEA) (2021) *European Maritime Transport Environmental Report (EMTER) 2021*. [Electronic resource]. Available at: https://www.emsa.europa.eu

8. Ahmed, S., Li, T., Zhou, X. Y., Yi, P., Chen, R. (2024) *Quantifying the environmental footprints of biofuels for sustainable passenger ship operations. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, Article 114919. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114919

9. Hamed, M. et al. (2024) *Impacts of climate change and black sand on Red Sea, Egypt. A comprehensive review. Regional Studies in Marine Science*, 78, Article 103787. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103787

10. Li, Z., Wang, K., Liang, H. et al. (2025) *Marine alternative fuels for shipping decarbonization: Technologies, applications and challenges. Energy Conversion and Management*, 329, Article 119641. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119641

11. Wang, X. et al. (2025) *Global shipping emissions from 1970 to 2021: Structural and spatial change driven by trade dynamics. One Earth*, Article 101243. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101243

12. Abraham, E. J. et al. (2024) *Large-scale shipping of low-carbon fuels and carbon dioxide towards decarbonized energy systems: Perspectives and challenges. International Journal of Hydrogen Energy*, 63, P. 217–230. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.140

13. Robin, R. et al. (2024) *Integrated Coastal Zone Management practices and cumulative environmental impacts: The case of Vembanad Lake. Ecohydrology of Kerala*, P. 257–293. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95606-2.00002-4

14. Merrie, A. et al. (2014) *An ocean of surprises – Trends in human use, unexpected dynamics and governance challenges in areas beyond national jurisdiction. Global Environmental Change*, 27, P. 19–31. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.012

15. Kovtun, T., Kovtun, D. (2021) *Environmental product as a result of greening logistics activities. Transport Development*, 3(10), P. 19–29. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2021.3-10.02

16. Danylyan, A., Maslov, I., Tiron-Vorobiova, N. (2021) *Ecology and savings of diesel fuel in the scientific review of new technologies of its combustion. Transport Development*, 2(7), P. 86–97. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2020.2-7.08

17. Onyshchenko, S. P., Melnyk, O. M., Voloshyn, A. O., Kalinichenko, Y. V., Zaiats, S. V. (2021) *Review of the main mechanisms for managing energy efficiency and emissions control of marine vessels. Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 197, P. 121–129. DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.197.2021.248314

18. Melnyk, O., Shcherbina, O., Mykhailova, I., Obnyavko, T., Korobko, T. (2023) *Focused research on technological innovations in the shipping industry: Review and prospects. Transport Development*, 1(16), P. 164–174. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.13

19. Melnyk, O. M. et al. (2023) *Concept and prospects of using hydrogen fuel in maritime transport. Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 203, P. 96–105

20. Melnyk, O. M. (2023) *Assessment of the impact of energy efficiency on ship operation safety. Podilskyi Herald: Agriculture, Engineering, Economics*, 2(39), P. 76–81. DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11

УДК 621.039.526 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.22

М. М. НЕНЯ
аспірант
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0009-0009-9193-9403

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНФІГУРАЦІЙ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЗБІРОК У ВВЕР-1000 З УРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖЕНЬ ОБОЛОНОК ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Актуальність дослідження зумовлено необхідністю удосконалення підходів до формування конфігурацій тепловиділяючих збірок у реакторах типу ВВЕР-1000 в умовах підвищених експлуатаційних навантажень, потреби забезпечення паливної ефективності та зниження ризиків пошкодження оболонок паливних елементів.

Метою статті є запропонування дискретної моделі та концепції методу оптимізації перестановок тепловиділяючих збірок у активній зоні реактора типу ВВЕР-1000, яка враховує одночасно кілька критично важливих параметрів – теплове навантаження, рівномірність нейтронного поля, напружено-деформований стан оболонок та очікуване вигоряння палива.

Методи дослідження базуються на логіко-аналітичному підході, що включає огляд наукових публікацій з теми оптимізації активної зони, узагальнення критеріїв ефективності розміщення ТВЗ, а також побудову структурної схеми майбутньої дискретної моделі з використанням елементів евристичного моделювання. Проведено систематизацію вимог до алгоритмів, які могли б бути реалізовані у формі генетичних або інших еволюційних методів. У межах роботи запропоновано складники моделі, визначено вхідні параметри та окреслено потенційні обмеження для подальшої математичної формалізації.

Результати дослідження дали змогу обґрунтувати доцільність багатокритеріального підходу до оптимізації розміщення ТВЗ, в якому враховуються взаємозалежні показники безпеки, ресурсу та енергетичної рівномірності. Виявлено основні структурні елементи моделі, які можуть бути використані для подальшого формального проєктування обчислювального алгоритму.

Наукова новизна полягає у формулюванні дискретної моделі конфігурації ТВЗ, яка враховує динамічний характер паливного циклу, потенційну змінність меж допустимих навантажень і необхідність поєднання суперечливих критеріїв у межах одного оптимізаційного підходу.

Висновки підтверджують доцільність розроблення нової багатокритеріальної моделі оптимізації конфігурацій ТВЗ, яка дозволяє знизити ризик перевантаження оболонок, вирівняти теплове поле та забезпечити стабільність функціонування активної зони протягом усього паливного циклу.

Перспективи подальших досліджень полягають у математичному формалізуванні запропонованої моделі, розробленні прототипу алгоритму з використанням генетичних методів, а також верифікації отриманих рішень на основі даних реальних паливних кампаній.

Ключові слова: *адаптивне керування, енергоефективність, модульна архітектура, сенсорні технології, стабільність гальмування, зносостійкість.*

M. M. NENIA
Postgraduate Student
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0009-0009-9193-9403

OPTIMIZATION OF FUEL ASSEMBLY CONFIGURATIONS IN VVER-1000 REACTORS CONSIDERING FUEL ROD CLADDING DAMAGE

Relevance of the study is due to the growing need to improve the approaches to configuring fuel assembly layouts in VVER-1000 reactors under increased operational loads, with an emphasis on fuel efficiency and the mitigation of fuel rod cladding damage risks.

The aim of the article is to propose a discrete model and conceptual optimization method for rearranging fuel assemblies in the VVER-1000 reactor core, taking into account several critical parameters simultaneously – such as thermal load distribution, neutron flux uniformity, mechanical stress on cladding, and predicted fuel burnup.

Research methods are based on a logic-analytical approach that includes a review of relevant scientific literature, synthesis of core performance criteria, and the development of a structural framework for a future discrete model using heuristic modeling principles. The study outlines the necessary input parameters and constraints, and presents a conceptual structure for implementing an optimization method– potentially using evolutionary algorithms such as genetic approaches– without focusing on direct algorithmic realization.

Research results allow for the justification of a multicriteria approach to optimizing core configurations, addressing key interdependent indicators related to reactor safety, cladding durability, and energy generation uniformity. The main components of the model are identified, offering a foundation for further formal development and testing.

Scientific novelty lies in the formulation of a discrete optimization model that integrates variable operational conditions, evolving fuel characteristics, and conflicting performance objectives into a unified decision-making framework for core design.

Conclusions confirm the feasibility of developing a multicriteria model for optimizing fuel assembly arrangements, enabling reductions in localized overheating, improved burnup distribution, and enhanced cladding performance over the fuel cycle.

Prospects for further research include mathematical formalization of the proposed model, creation of an algorithmic prototype using genetic methods, and validation of solutions using real-world fuel cycle data.

Key words: *adaptive control, energy efficiency, modular architecture, sensor technologies, braking stability, wear resistance.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР-1000 зростає необхідність удосконалення підходів до проєктування та оптимізації конфігурацій тепловиділяючих збірок (ТВЗ), зокрема в контексті підвищених вимог до безпеки та паливної ефективності. Одним із критично важливих аспектів, що обмежує надійність і довговічність паливних елементів, є пошкодження оболонок паливних стрижнів, які можуть виникати внаслідок термомеханічного навантаження, корозійних процесів або нерівномірного розподілу потужності в активній зоні. Такі пошкодження не лише ускладнюють технічну експлуатацію, а й створюють додаткові ризики втрати герметичності та порушення нормального функціонування реакторної установки.

Наукове завдання полягає у виявленні закономірностей взаємозв'язку між просторовою конфігурацією паливних збірок та виникненням критичних навантажень на оболонки паливних елементів, що дозволяє розробити математичні моделі для прогнозування і мінімізації ризиків пошкоджень. Практична значущість полягає в можливості впровадження нових стратегій оптимізації завантаження паливних збірок, які враховують граничні параметри експлуатації та сприяють зменшенню кількості відмов, підвищенню коефіцієнта використання палива та продовженню міжремонтного циклу. Таким чином, формулювання проблеми оптимізації конфігурацій ТВЗ із урахуванням пошкоджень оболонок є актуальним як для підвищення безпеки ядерних енергоблоків, так і для забезпечення економічної ефективності паливного циклу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема оптимізації конфігурацій тепловиділяючих збірок у реакторах ВВЕР-1000 з урахуванням пошкоджень оболонок паливних елементів охоплює чотири основні наукові напрями. Перший напрям зосереджений на розробці алгоритмічних і автоматизованих методів оптимізації паливних завантажень з урахуванням ресурсу оболонок. С. М. Пелих (S. N. Pelykh), М. В. Максимов (M. V. Maksimov) та Ґ. Т. Паркс (G. T. Parks) [1] запропонували метод, що одночасно враховує вигоряння палива та ступінь пошкодження оболонок твелів, забезпечуючи баланс між ефективністю та безпекою. У подальшій роботі С. Пелих, М. Фролов, А. Наливайко та Х. Чжоу [2] описано автоматизовану систему контролю за параметром пошкодження оболонок під час експлуатації ВВЕР-1000, яка сприяє точному моніторингу технічного стану активної зони. Дослідження С. М. Пелиха (S. N. Pelykh) [3] присвячено методологічному удосконаленню розрахунку параметра пошкодження оболонок за нормальних умов, що є ключовим для подальших оптимізаційних алгоритмів. Перспективними є дослідження, що поєднують алгоритмічну оптимізацію з реальними даними сенсорного моніторингу пошкоджень твелів для створення адаптивних моделей конфігурації.

Другий напрям охоплює дослідження безпеки та поведінки паливних елементів у нормальних та аварійних умовах. С. Х. Абдель-Латіф (S. H. Abdel-Latif), С. А. Васфі (S. A. Wasfy) та А. М. Рефаей (A. M. Refaey) [4] аналізують збереження цілісності твелів під час втрати потоку теплоносія (LOFA), що дає змогу враховувати аварійні сценарії в оптимізації конструкцій. М. Ю. М. Мохсен (M. Y. M. Mohsen) та М. А. Е. Абдель-Рахман (M. A. E. Abdel-Rahman) [5] проводять детальну оцінку безпеки паливних збірок ВВЕР-1000, а в подальшій роботі разом із А. А. Ґалахомом (A. A. Galahom) [6] досліджують інтеграцію ATF-матеріалів, які підвищують термічну та механічну стійкість оболонок. К. М. Яссін (K. M. Yassin), М. Х. Хассан (M. H. Hassan), М. М. Гонейм (M. M. Ghoneim), М. С. Ельколіль (M. S. Elkolil), А. Аліян (A. Alyan) та С. А. Аґамі (S. A. Agamy) [7] моделюють поведінку палива в умовах експлуатації, поєднуючи теплові та механічні характеристики оболонок. Подальші дослідження мають бути спрямовані на узгодження результатів мультифізичного моделювання з експериментальними даними для точнішої оцінки граничних умов пошкодження оболонок.

Третій напрям стосується конструкційних інновацій і матеріалознавчих рішень, що сприяють зниженню напружень у оболонках. О. Сафарзаде (O. Safarzadeh) і М. Карані-Тамай (M. Qarani-Tamai) [8] аналізують вплив покриттів tolerant-to-accidents на зміну фізичних характеристик активної зони, а В. Лутфі (W. Luthfi), Х. Адріал (H. Adrial) і А. Хакім (A. Khakim) [9] пропонують дворівневу конструкцію твелів (duplex fuel), яка знижує

напруження оболонок. Т. Назарі (T. Nazari), А. Рабії (A. Rabiee) та Х. Каземіжад (H. Kazeminejad) [10] досліджують модальні характеристики збірок, які можуть спричиняти мікропошкодження оболонок, тоді як Д. Восуггі (J. Vosoughi), Н. Восуггі (N. Vosoughi) та А. А. Салехі (A. A. Salehi) [11] моделюють ефект викривлення збірки, що впливає на розподіл потужності та локальне перевантаження оболонок. Доцільно розширити в цьому напрямі застосування композитних матеріалів у конструкції оболонок та оптимізувати параметри охолодження на основі аналізу термомеханічного стану.

Четвертий напрям присвячено перспективним паливним концепціям і структурним інноваціям, що впливають на розподіл потужності та теплове навантаження. Х. Н. Чан (H. N. Tran), В. К. Хоанг (V. K. Hoang), П. Х. Ліем (P. H. Liem) та Х. Т. Хоанг (H. T. Hoang) [12] обґрунтовують застосування поглиначів вигоряння для зниження локального навантаження оболонок. А. Флорес (A. Y. Flores), М. Ржегулка (M. Rzehulka) та Ґ. Маццініі (G. Mazzini) [13] вивчають змішані конфігурації ядра та їхній вплив на викиди радіонуклідів і водню, пов'язані з деградацією оболонок. М. Т. Ахмед (M. T. Ahmed) і А. Шеллі (A. Shelley) [14] аналізують анулярні твели, які покращують нейтронно-фізичний баланс активної зони, а С. Насірі (S. Nasiri) та Ґ. Р. Ансаріфар (G. R. Ansarifar) [15] проводять повний нейтронно-динамічний аналіз ATF з урахуванням реакційної здатності та параметрів стійкості оболонок. Варто зосередити подальші дослідження на інтеграції нових матеріалів у конструкцію збірок з урахуванням тривалих циклів навантаження та високотемпературної деградації оболонок.

Загалом, аналіз підтверджує, що ефективна оптимізація тепловиділяючих збірок у ВВЕР-1000 неможлива без урахування параметрів пошкодження оболонок твелів, які потребують мультидисциплінарного підходу до розрахунків, моделювання та застосування матеріалів нових поколінь. Перспективними є напрями, що поєднують автоматизовані системи моніторингу, інноваційні конструкції збірок і ATF-матеріали з адаптивними алгоритмами завантаження.

Незважаючи на наявність значного обсягу наукових досліджень, низка аспектів оптимізації конфігурацій тепловиділяючих збірок у реакторах типу ВВЕР-1000 залишається невирішеною. Зокрема, недостатньо вивчено вплив просторового розміщення ТВЗ на формування зон локального перевантаження оболонок паливних елементів, особливо в умовах змінних теплових і нейтронних навантажень. Існуючі методології часто не враховують багатокритеріальні залежності, що включають безпеку, рівномірність розподілу потужності та ресурс оболонок. Обмеження пов'язані також із високою обчислювальною складністю задачі, відсутністю адаптивних моделей та недостатнім емпіричним обґрунтуванням вибору критеріїв ефективності.

Запропоноване дослідження спрямовано на заповнення зазначених прогалин шляхом обґрунтування нових критеріїв оцінки конфігурацій ТВЗ і розробки концепції дискретної моделі оптимізації, що враховує багатофакторний вплив на оболонки паливних елементів. Запропоновано використання генетичних алгоритмів як основи для побудови адаптивного методу, здатного враховувати зміну параметрів протягом паливного циклу. Таким чином, дослідження поглиблює теоретичне розуміння механізмів просторових перевантажень та пропонує підґрунтя для практичного удосконалення процесів паливного планування.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є розроблення дискретної моделі та методу оптимізації перестановок ТВЗ у активній зоні реактора типу ВВЕР-1000, що враховує багатокритеріальні залежності з метою мінімізації пошкоджень оболонок паливних елементів та досягнення рівномірного розподілу теплових і нейтронних характеристик.

Завдання статті

1. Проаналізувати вплив просторового розміщення ТВЗ на утворення локальних перевантажень оболонок паливних елементів з урахуванням теплових і нейтронних характеристик активної зони.
2. Обґрунтувати систему критеріїв ефективності конфігурацій активної зони з позицій безпеки, рівномірності навантажень і довговічності паливних елементів.
3. Виявити обмеження існуючих підходів та запропонувати дискретну модель оптимізації перестановок ТВЗ на основі генетичних алгоритмів з урахуванням багатокритеріальних залежностей.

Викладення основного матеріалу дослідження

У структурі активної зони реакторів типу ВВЕР-1000 формування оптимальної конфігурації ТВЗ є одним із ключових чинників забезпечення рівномірного розподілу теплового навантаження та довговічності паливних елементів. Просторове розміщення збірок визначає інтенсивність локального енерговиділення, що безпосередньо впливає на температурні градієнти, швидкість накопичення пошкоджень оболонок і ризик втрати герметичності. Надмірна щільність тепловиділення в окремих ділянках призводить до утворення зон перевантаження, в яких оболонки паливних елементів піддаються підвищеним термомеханічним та нейтронним навантаженням. З урахуванням того, що герметичність оболонки є критичним бар'єром безпеки, дослідження впливу геометричного фактору розміщення ТВЗ набуває першочергового значення для прогнозування довготривалої поведінки палива та мінімізації аварійних ризиків (табл. 1).

Таблиця 1

Взаємозв'язок між розміщенням ТВЗ та ризиком локального перевантаження оболонок паливних елементів

Характеристика конфігурації ТВЗ	Типова ознака локалізації навантаження	Потенційні наслідки для оболонок паливних елементів
Центральне розміщення збірок із підвищеним збагаченням	Формування теплових піків у центрі активної зони	Прискорене старіння та ризик розтріскування оболонок
Групування ТВЗ з однаковими характеристиками по секторах	Локалізована інтенсивність нейтронного потоку	Нерівномірне розширення оболонок, мікротріщини
Змішане чергування ТВЗ із різним ступенем вигоряння	Зниження контрасту енерговиділення	Рівномірне навантаження, зниження ризику пошкоджень
Розміщення збірок із пошкодженими оболонками поблизу свіжих	Різке збільшення температурного градієнта	Поглиблення дефектів, ймовірність втрати герметичності
Віддалення ТВЗ із підвищеним ризиком від центральної області	Зменшення локального перевантаження	Підвищення ресурсу оболонок і безпеки паливного циклу

Джерело: сформовано автором на підставі [1; 2; 6; 7; 10; 11]

У практиці експлуатації реакторів типу ВВЕР-1000 конфігурація ТВЗ визначає не лише загальний розподіл потужності в активній зоні, але й локальний характер навантажень, які сприймаються оболонками паливних елементів. Як засвідчують експлуатаційні спостереження та дані постреакторного контролю, саме неправильно збалансоване просторове розміщення ТВЗ є чинником формування критичних зон із підвищеною температурою, напруженнями та флюенсом нейтронів. Зокрема, концентрація збірок зі свіжим паливом у центрі активної зони без урахування градієнтів вигоряння призводить до утворення температурних аномалій, що викликають зниження пластичності оболонок і зростання ризику утворення міжкристалічних тріщин [4]. Натомість конфігурації зі змішаним розташуванням ТВЗ продемонстрували в умовах реальних кампаній зменшення амплітуди термомеханічних коливань, що забезпечує стабільніший стан оболонки протягом паливного циклу. Таким чином, практичне застосування принципів керованої симетрії та компенсованого вигоряння в розміщенні збірок дозволяє суттєво знизити частку пошкоджених паливних елементів, оптимізувати режим роботи реактора та підвищити ресурс використання активної зони без зменшення її енергетичної ефективності.

Теплові та нейтронні параметри активної зони є критично важливими показниками, що визначають ефективність і безпеку функціонування ядерного реактора типу ВВЕР-1000. Ці параметри залежать не лише від фізичних характеристик палива та теплоносія, але й від конфігурації завантаження ТВЗ, яка змінюється з урахуванням вигоряння, реактивності, необхідності регулювання потужності та обмеження температурних піків. Реальні сценарії пошкодження паливних оболонок в умовах експлуатації часто пов'язані з нерівномірністю теплових потоків і локальним накопиченням нейтронного опромінення, що посилює крихкість матеріалу оболонки та прискорює деградаційні процеси [11]. У зв'язку з цим аналіз теплових і нейтронних характеристик для різних схем розміщення ТВЗ дозволяє ідентифікувати зони ризику та розробити більш збалансовані конфігурації, які підвищують надійність паливної кампанії (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив типових конфігурацій завантаження ТВЗ на теплові та нейтронні параметри активної зони

Конфігурація завантаження	Профіль теплового навантаження	Нейтронне поле	Вірогідність пошкодження оболонок
Радіально симетрична (чергування ТВЗ із різним вигорянням)	Помірна, із згладженими градієнтами	Рівномірне, із зменшеними флуктуаціями	Низька, за умови рівномірного збагачення
Централізоване розміщення свіжого палива	Високе в центральній частині, різкий градієнт до периферії	Локальні піки флюенсу нейтронів	Висока, зокрема для оболонок у центральних ТВЗ
Квазішахове розташування ТВЗ із регулюючими вставками	Локальні теплові спади навколо вставок	Асиметричне, із зонами зниженого потоку	Помірна, залежно від термогідравлічних умов
Конфігурація з екрануванням дефектних ТВЗ	Зменшене локальне навантаження на пошкоджені зони	Локальне згладжування флюенсу	Знижена в обмеженій області
Стандартне тригексагональне завантаження без оптимізації	Нерівномірне, залежне від вигоряння	Випадкова неоднорідність	Підвищена, з непередбачуваною локалізацією
Конфігурація завантаження	Профіль теплового навантаження	Нейтронне поле	Вірогідність пошкодження оболонок

Джерело: сформовано автором на підставі [1; 5; 8; 9; 12; 15]

У сучасних умовах на АЕС із ВВЕР-1000 впровадження автоматизованих систем планування завантаження активної зони базується на використанні обчислювальних кодів, які дозволяють моделювати розподіл теплових і нейтронних характеристик з високою просторовою точністю. Практика показала, що конфігурації із чергуванням

збірок різного вигоряння та використанням зонального екранування дефектних ТВЗ дозволяють суттєво знизити ймовірність перевищення критичних значень теплового навантаження на оболонки [5]. Застосування детального аналізу флюенсних карт і розрахунків коефіцієнтів локального перегріву дає змогу обґрунтовано прогнозувати зони підвищеного ризику, що, у свою чергу, підвищує якість технічних рішень щодо оптимізації розміщення ТВЗ. У поєднанні з інструментами статистичної оцінки на основі історичних даних пошкоджень це створює передумови для переходу до індивідуалізованих моделей планування паливних кампаній з підвищеним рівнем надійності.

Оцінювання ефективності конфігурацій активної зони у реакторах типу ВВЕР-1000 потребує багатокритеріального підходу, що базується на поєднанні технічних, експлуатаційних і безпекових параметрів. В умовах сучасних навантажень на енергоблоки критичними стають не лише інтегральні показники вигоряння чи енерговіддачі, а й характеристика просторової рівномірності теплових і нейтронних полів, максимальні локальні значення напружень у оболонках та довговічність паливних елементів. Вибір критеріїв оцінювання повинен відображати не лише здатність конфігурації до енергетичного виробітку, а й її стабільність у часі, відсутність зон пікових навантажень, мінімальну ймовірність пошкоджень та прогнозований ресурс палива. У зв'язку з цим доцільним є формалізований підхід, який дозволяє порівнювати конфігурації на основі узагальнених, але фізично вивірених критеріїв ефективності (табл. 3).

Таблиця 3

Критерії ефективності для оцінювання конфігурацій активної зони реактора ВВЕР-1000

Критерій ефективності	Фізичний зміст	Значення для безпеки та ресурсу
Максимальна теплова потужність на ТВЗ	Пікове значення лінійного тепловиділення	Визначає ризик перегріву оболонок, межа для допустимих навантажень
Градієнт вигоряння між сусідніми збірками	Різниця у накопиченій енергії	Високі значення спричиняють нерівномірне розширення і втому матеріалу оболонок
Рівномірність розподілу нейтронного потоку	Коливання флюенсу в активній зоні	Пов'язана зі швидкістю радіаційного пошкодження та корозії
Індекс напружень оболонки (σmax/σдоп)	Відношення максимальних напружень до допустимих	Показує наближення до межі пластичності та ризик втрати герметичності
Сумарне очікуване вигоряння ТВЗ	Прогнозована тривалість паливного циклу	Визначає економічну доцільність та ефективність використання палива

Джерело: сформовано автором на підставі [1; 5; 6; 10; 11; 15]

Так, автоматизовані розрахункові комплекси дозволяють побудувати карту градієнтів вигоряння для конкретної конфігурації, що дає змогу уникнути розташування збірок із різким контрастом за активністю. Значення максимального лінійного тепловиділення контролюється не лише на етапі проектування, а й протягом циклу за допомогою даних нейтронно-фізичних вимірювань, що дає змогу оперативно коригувати режим. Індекс напружень оболонок оцінюється за результатами термомеханічного моделювання, яке враховує локальні температури, гідростатичний тиск і вплив іонізаційного опромінення. У поєднанні ці критерії дозволяють комплексно оцінити надійність та ресурсність конфігурації, виявити потенційно проблемні зони та сформувати раціональну стратегію оптимізації, орієнтовану як на продовження терміну служби ТВЗ, так і на дотримання нормативних вимог безпеки.

У процесі реалізації алгоритмів оптимізації перестановок ТВЗ у активній зоні реактора типу ВВЕР-1000 виникає низка технічних і методологічних проблем, які суттєво ускладнюють досягнення збалансованого розв'язання багатокритеріального завдання. Однією з ключових перешкод є надвисока розмірність простору можливих конфігурацій, що зростає експоненційно зі збільшенням кількості збірок і типів палива. Така комбінаційна складність потребує застосування евристичних або метаевристичних підходів, оскільки перебір усіх варіантів є обчислювально неприйнятним навіть за умов використання високопродуктивних обчислювальних систем [1]. Крім того, структура оптимізації є динамічною за своєю природою: параметри, що визначають якість рішення (вигоряння, температура, нейтронний флюенс, механічний стан оболонок), змінюються впродовж паливного циклу, що унеможливлює використання статичних моделей [3].

Ще однією суттєвою проблемою є складність адекватного врахування реальних експлуатаційних умов, зокрема флуктуацій температурного поля, змін у регулюючих вставках, впливу радіаційного здуття та повзучості оболонок. Більшість існуючих моделей спрощують ці процеси, ігноруючи взаємозалежність між локальними пошкодженнями та еволюцією нейтронного поля [11]. Відсутність доступу до детальних даних пошкоджень або обмеженість історичних спостережень унеможливлює повноцінну валідацію складних моделей. Крім того, на практиці спостерігається конфлікт між цільовими функціями оптимізації: зниження пікового навантаження часто відбувається за рахунок зменшення сумарного вигоряння або зростання нерівномірності енерговиділення в інших зонах активної зони [15]. В результаті потрібне формування компромісного розв'язання, яке враховує множину суперечливих критеріїв і забезпечує прийнятний рівень безпеки та ресурсної ефективності.

У сучасній практиці управління ядерними паливними кампаніями питання оптимального розміщення тепловиділяючих збірок в активній зоні реакторів типу ВВЕР-1000 набуло особливої актуальності через необхідність досягнення балансу між ефективністю енерговиробництва, безпековими вимогами та ресурсною стійкістю паливних елементів. Дискретна модель, побудована на основі генетичних алгоритмів, спрямована на розв'язання задачі комбінаційного характеру з великою кількістю змінних і обмежень, які охоплюють теплові, нейтронні, механічні та економічні параметри. Така модель дозволяє знаходити компромісні рішення у багатовимірному просторі конфігурацій, де класичні методи оптимізації є малоефективними або неадаптивними до складної структури завдання.

На відміну від традиційних методів жорсткого моделювання, що використовують локальну оптимізацію або статичні припущення, генетичний підхід дозволяє враховувати динамічний характер паливного циклу та варіативність вхідних параметрів. Основними складниками моделі є: кодування кожної конфігурації ТВЗ у вигляді хромосоми, оцінювання кожної особини за багатокритеріальною цільовою функцією (враховується теплове навантаження, флюенс, напруження оболонок, вигоряння, симетричність), селекція, кросовер, мутація, а також введення адаптивного коефіцієнта ваг для керування пріоритетами критеріїв у різні етапи ітерацій. Вхідні дані для моделі включають вигоряння кожної ТВЗ, рівень збагачення, історію пошкоджень, допуски з точки зору безпеки, а також конструктивні обмеження реакторної установки (рис. 1).



Рис. 1. Структура дискретної моделі оптимального розміщення ТВЗ на основі генетичних алгоритмів

Джерело: власна розробка автора

У реальних умовах експлуатації АЕС ця модель дозволяє автоматизувати процес планування завантаження активної зони, замінюючи ручне або експертне розміщення ТВЗ на обґрунтовану ітеративну процедуру з високим ступенем точності. Практична ефективність полягає у здатності зменшити пікові навантаження на оболонки, мінімізувати кількість пошкоджених елементів, досягти більш рівномірного вигоряння та подовжити тривалість паливного циклу без перевищення нормативних меж безпеки. Використання багатокритеріального підходу дозволяє адаптувати модель до різних стратегій – від зниження експлуатаційних витрат до зменшення імовірності позаштатних ситуацій. У перспективі така модель може бути інтегрована в системи підтримки прийняття рішень на АЕС, забезпечуючи обґрунтоване, швидке та гнучке коригування стратегії паливного завантаження у відповідь на зміну вихідних параметрів або появу нових обмежень.

Висновки

У результаті дослідження встановлено, що конфігурація тепловиділяючих збірок у реакторі ВВЕР-1000 суттєво впливає на рівномірність розподілу теплових і нейтронних навантажень, ризик пошкодження оболонок паливних елементів і безпеку експлуатації. Обґрунтовано доцільність застосування багатокритеріального підходу до оцінювання ефективності завантаження активної зони, який враховує теплове навантаження, флюенс, градієнти вигоряння та механічний стан оболонок. Виявлено ключові проблеми реалізації оптимізації перестановок ТВЗ, серед яких надмірна комбінаційна складність, динамічність паливного циклу, суперечливість критеріїв ефективності та нестача достовірних експлуатаційних даних. Розроблена дискретна модель на основі генетичних алгоритмів дозволяє формувати оптимальні конфігурації ТВЗ, що забезпечують мінімізацію перевантажень, підвищення довговічності палива та покращення балансу між ефективністю й безпекою. Перспективи подальших

досліджень пов'язані з інтеграцією методів машинного навчання для адаптації моделі до реальних умов експлуатації та розширенням емпіричної бази для точнішої параметризації оптимізаційних критеріїв.

Список використаної літератури

1. Pelykh S. N., Maksimov M. V., Parks G. T. A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup. *Nuclear Engineering and Design*. 2013. Vol. 257, № 1. P. 53–60. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.12.022

2. Пелих С., Фролов М., Наливайко А., Чжоу Х. Автоматизована система керування властивостями ядерного палива ВВЕР-1000 з урахуванням параметра пошкодження оболонок твелів. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2018. Вип. 1(54). С. 46–50. DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.54.2018.06

3. Pelykh S. N. The cladding damage parameter under normal operating conditions in VVER fuel design: Resolving contradictions. *Nuclear Engineering and Design*. 2021. Vol. 379, № 1. Article 111198. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111198

4. Abdel-Latif S. H., Wasfy S. A., Refaey A. M. A study of VVER-1000 fuel rod integrity during LOFA. *Progress in Nuclear Energy*. 2023. Vol. 159, № 1. Article 104650. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104650

5. Mohsen M. Y. M., Abdel-Rahman M. A. E. Detailed safety assessment for the VVER-1000 fuel assembly. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*. 2021. Vol. 15, № 1. P. 36–60. DOI: https://doi.org/10.1504/IJNEST.2021.120138

6. Mohsen M. Y. M., Abdel-Rahman M. A. E., Galahom A. A. Integrated analysis of VVER-1000 fuel assembly fueled with accident tolerant fuel (ATF) materials. *Annals of Nuclear Energy*. 2021. Vol. 159, № 1. Article 108330. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108330

7. Yassin K. M., Hassan M. H., Ghoneim M. M., Elkolil M. S., Alyan A., Agamy S. A. Multiphysics simulation of VVER-1200 fuel performance during normal operating conditions. *Nuclear Science and Techniques*. 2023. Vol. 34, № 1. Article 28. DOI: https://doi.org/10.1007/s41365-023-01172-9

8. Safarzadeh O., Qarani-Tamai M. Full-core reactor physics analysis for accident tolerant cladding in a VVER-1000 reactor. *Annals of Nuclear Energy*. 2021. Vol. 155, № 1. Article 108163. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108163

9. Luthfi W., Adrial H., Khakim A. Study on neutronic behavior of VVER-1000 fuel assembly with duplex fuel rod design. *Nuclear Engineering and Design*. 2024. Vol. 422, № 1. Article 113168. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113168

10. Nazari T., Rabiee A., Kazeminejad H. Numerical investigation of the modal characteristics for a VVER-1000 fuel assembly. *Nuclear Engineering and Design*. 2019. Vol. 345, № 1. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.02.004

11. Vosoughi J., Vosoughi N., Salehi A. A. Development of a calculation model to simulate the effect of bowing of the VVER-1000 reactor fuel assembly on power distribution. *Annals of Nuclear Energy*. 2023. Vol. 181, № 1. Article 109535. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109535

12. Tran H. N., Hoang V. K., Liem P. H., Hoang H. T. Neutronics design of VVER-1000 fuel assembly with burnable poison particles. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019. Vol. 51, № 7. P. 1729–1737. DOI: https://doi.org/10.1016/j.net.2019.05.026

13. Flores A. Y., Rzehulka M., Mazzini G. Influence of mixed core in the radionuclides releases and hydrogen production for VVER-1000. *Nuclear Engineering and Design*. 2024. Vol. 417, № 1. Article 112858. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112858

14. Ahmed M. T., Shelley A. Annular fuel for VVER-1000 reactor: Moderation impact on neutronic behavior. *Progress in Nuclear Energy*. 2023. Vol. 165, № 1. Article 104907. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104907

15. Nasiri S., Ansarifar G. R. Neutronic design and analysis of the accident-tolerant fuel (ATF) application to VVER-1000 nuclear reactor as well as evaluation of dynamic parameters. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. Vol. 432, № 1. Article 113814. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113814

References

1. Pelykh, S. N., Maksimov, M. V., & Parks, G. T. (2013). A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup. *Nuclear Engineering and Design, 257*(1), 53–60. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.12.022

2. Pelykh, S., Frolov, M., Nalyvayko, A., & Zhou, H. (2018). Avtomatyzovana systema keruvannia vlastyvostiamy yadernoho palyva VVER-1000 z urakhuvanniam parametra poshkodzhennia obolonok tveLiv [Automated system for controlling VVER-1000 nuclear fuel properties considering fuel cladding damage parameter]. *Pratsi Odeskoho politekhnichnoho universytetu – Proceedings of the Odessa Polytechnic University, 1*(54), 46–50. DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.54.2018.06 [in Ukrainian].

3. Pelykh, S. N. (2021). The cladding damage parameter under normal operating conditions in VVER fuel design: Resolving contradictions. *Nuclear Engineering and Design, 379*(1), Article 111198. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111198

4. Abdel-Latif, S. H., Wasfy, S. A., & Refaey, A. M. (2023). A study of VVER-1000 fuel rod integrity during LOFA. *Progress in Nuclear Energy, 159*(1), Article 104650. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104650

5. Mohsen, M. Y. M., & Abdel-Rahman, M. A. E. (2021). Detailed safety assessment for the VVER-1000 fuel assembly. *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology, 15*(1), 36–60. DOI: https://doi.org/10.1504/IJNEST.2021.120138

6. Mohsen, M. Y. M., Abdel-Rahman, M. A. E., & Galahom, A. A. (2021). Integrated analysis of VVER-1000 fuel assembly fueled with accident tolerant fuel (ATF) materials. *Annals of Nuclear Energy, 159*(1), Article 108330. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108330

7. Yassin, K. M., Hassan, M. H., Ghoneim, M. M., Elkolil, M. S., Alyan, A., & Agamy, S. A. (2023). Multiphysics simulation of VVER-1200 fuel performance during normal operating conditions. *Nuclear Science and Techniques, 34*(1), Article 28. DOI: https://doi.org/10.1007/s41365-023-01172-9

8. Safarzadeh, O., & Qarani-Tamai, M. (2021). Full-core reactor physics analysis for accident tolerant cladding in a VVER-1000 reactor. *Annals of Nuclear Energy, 155*(1), Article 108163. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108163

9. Luthfi, W., Adrial, H., & Khakim, A. (2024). Study on neutronic behavior of VVER-1000 fuel assembly with duplex fuel rod design. *Nuclear Engineering and Design, 422*(1), Article 113168. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113168

10. Nazari, T., Rabiee, A., & Kazeminejad, H. (2019). Numerical investigation of the modal characteristics for a VVER-1000 fuel assembly. *Nuclear Engineering and Design, 345*(1), 1–6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.02.004

11. Vosoughi, J., Vosoughi, N., & Salehi, A. A. (2023). Development of a calculation model to simulate the effect of bowing of the VVER-1000 reactor fuel assembly on power distribution. *Annals of Nuclear Energy, 181*(1), Article 109535. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109535

12. Tran, H. N., Hoang, V. K., Liem, P. H., & Hoang, H. T. (2019). Neutronics design of VVER-1000 fuel assembly with burnable poison particles. *Nuclear Engineering and Technology, 51*(7), 1729–1737. DOI: https://doi.org/10.1016/j.net.2019.05.026

13. Flores, A. Y., Rzehulka, M., & Mazzini, G. (2024). Influence of mixed core in the radionuclides releases and hydrogen production for VVER-1000. *Nuclear Engineering and Design, 417*(1), Article 112858. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112858

14. Ahmed, M. T., & Shelley, A. (2023). Annular fuel for VVER-1000 reactor: Moderation impact on neutronic behavior. *Progress in Nuclear Energy, 165*(1), Article 104907. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104907

15. Nasiri, S., & Ansarifar, G. R. (2025). Neutronic design and analysis of the accident-tolerant fuel (ATF) application to VVER-1000 nuclear reactor as well as evaluation of dynamic parameters. *Nuclear Engineering and Design, 432*(1), Article 113814. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113814

УДК 666.972.4:691.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.23

М. Б. НЕСТЕРЕНКО
аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0007-9974-6150

ВИКОРИСТАННЯ ПІСКУ ТА ВАПНЯКУ ЯК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ НАПОВНЮВАЧІВ У МОДИФІКОВАНИХ ЦЕМЕНТНИХ В'ЯЖУЧИХ СУМІШАХ

У контексті підвищення ефективності сучасних будівельних матеріалів зростає інтерес до використання природних мінеральних компонентів як функціональних наповнювачів у складі цементних в'яжучих сумішей. Особливої актуальності набуває застосування піску та вапняку, які забезпечують економію цементу та істотно впливають на мікроструктуру, гідратаційні процеси, реологічні характеристики і довговічність матеріалів. Водночас, наявні дослідження здебільшого розглядають ці компоненти ізольовано, що не дозволяє в повній мірі оцінити їх синергічну дію в умовах локальної сировинної бази. Метою статті є обґрунтування доцільності та ефективності одночасного використання піску та вапняку як функціональних наповнювачів у модифікованих цементних сумішах з урахуванням їх фізико-хімічних властивостей, структурної ролі та впливу на ключові експлуатаційні показники. Для досягнення поставленої мети застосовано методи компаративного літературного аналізу порівняльної оцінки фізико-хімічних характеристик і систематизації даних. Встановлено, що пісок формує каркасну структуру матеріалу й оптимізує водоцементне співвідношення, тоді як вапняковий наповнювач бере участь у фізико-хімічних реакціях, зокрема утворенні карбоалюмінатів, та підвищує щільність і тріщиностійкість композиту. Виявлено, що комбіноване використання зазначених компонентів у певних пропорціях (до 30 % піску та до 20 % вапняку від маси цементу) дозволяє зменшити вміст цементу без істотного зниження міцності. Запропоновано рекомендації щодо раціонального використання нестандартної сировини (відходів піску, вапнякового пилу) та хімічних добавок для збереження реологічних властивостей. Здобуті результати мають практичну цінність для створення енергоефективних і довговічних будівельних композитів, придатних для використання в умовах обмежених ресурсів, зокрема в регіонах із нестачею якісної сировини. Перспективи подальших досліджень пов'язані з поглибленим вивченням тріщиностійкості та структурних змін у композитах за умов тривалого навантаження, а також із розробкою багатокомпонентних рецептур на основі локальних матеріалів.

Ключові слова: *мінеральні наповнювачі, вапняковий пил, кварцовий пісок, гідратація цементу, реологія сумішей, довговічність, мікроструктура.*

M. B. NESTERENKO
Postgraduate Student at the Department of Chemical Technology
of Composite Materials
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0007-9974-6150

USE OF SAND AND LIMESTONE AS FUNCTIONAL FILLERS IN MODIFIED CEMENT BINDERS

In the context of increasing the efficiency of modern building materials, there is growing interest in using natural mineral components as functional fillers in cement binder mixtures. The use of sand and limestone, which provides cement economy and significantly affects the microstructure, hydration processes, rheological characteristics and durability of materials, is particularly relevant. At the same time, existing studies mainly consider these components in isolation, which does not allow for a complete assessment of their synergistic effect in the conditions of the local raw material base. The article aims to substantiate the feasibility and effectiveness of the simultaneous use of sand and limestone as functional fillers in modified cement mixtures, taking into account their physicochemical properties, structural role and impact on key performance indicators. To achieve this goal, methods of comparative literature analysis, comparative assessment of physicochemical characteristics and data systematization were used. It was established that sand forms the framework structure of the material and optimizes the water-cement ratio. At the same time, the limestone filler participates in physicochemical reactions, particularly the formation of carboaluminates, and increases the density and crack resistance of the composite. It was found that the combined use of these components in specific proportions (up to 30 % sand and up to 20 % limestone by weight of cement) allows reducing the cement content without significantly reducing the strength. Recommendations are proposed for the rational use of non-standard raw materials (sand waste, limestone dust) and chemical additives to preserve rheological properties. The results obtained have practical value for creating energy-efficient and durable construction composites suitable for use in conditions of limited resources,

in particular in regions with a shortage of high-quality raw materials. Prospects for further research are related to an in-depth study of crack resistance and structural changes in composites under long-term loading conditions, as well as the development of multicomponent formulations based on local materials.

Key words: *mineral fillers, limestone dust, quartz sand, cement hydration, mixture rheology, durability, microstructure.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах розвитку будівельної індустрії дедалі більшої актуальності набуває завдання підвищення ефективності використання традиційних в'яжучих речовин шляхом їхньої модифікації мінеральними компонентами природного походження. Використання піску та вапняку як функціональних наповнювачів у цементних сумішах сприяє як оптимізації витрат цементу, так і дозволяє регулювати реологічні, міцні та довговічні властивості готових матеріалів, що особливо важливо для реалізації стратегії сталого розвитку у будівництві.

Сучасні дослідження підтверджують, що введення вапнякового наповнювача може істотно змінювати структуру цементного каменю, впливаючи на гідратаційні процеси та мікроструктуру [1]. З іншого боку, властивості піску, зокрема його мінералогічний склад, форма та розподіл за розміром часток, також визначають функціональні характеристики суміші [2]. У низці досліджень наголошується на ефективності застосування тонкодисперсних наповнювачів, зокрема вапняку, для покращення тиксотропних властивостей, зменшення водоцементного відношення та зниження усадки [3; 4]. Однак, незважаючи на численні публікації щодо ефектів застосування піску або вапняку окремо, в науковій літературі відсутні системні дослідження комплексного впливу цих компонентів на структуру та властивості модифікованих цементних в'яжучих сумішей в умовах використання локальної сировини [5].

Актуальність порушеної проблеми зумовлена потребою оптимізації складу цементних в'яжучих матеріалів з урахуванням технологічних, економічних та екологічних чинників. З огляду на це, дослідження особливостей формування структурно-механічних характеристик модифікованих в'яжучих сумішей із використанням піску та вапняку дозволить розширити науково-методичні підходи до створення ефективних будівельних матеріалів нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Серед сучасних наукових досліджень спостерігається зростаючий інтерес до застосування мінеральних наповнювачів у складі цементних композитів. Наприклад, у статті З. Цзян (Z. Jiang) та ін. було встановлено, що використання вапнякового наповнювача в самоущільнювальному бетоні сприяє підвищенню міцності на стиск, поліпшенню довговічності та зниженню водопоглинання за рахунок зміни гідратаційної активності [4]. У свою чергу, Б. Несіра (B. Nécira) та І. Абаду (Y. Abadou) подають порівняльний аналіз різних типів пісків і наповнювачів у складі самоуплотнювального розчину та доводять, що мінералогічне походження піску і його гранулометричний склад суттєво впливають на тиксотропні властивості та консистенцію суміші [5]. Слід також зазначити, що часткова заміна цементу та піску вапняковими наповнювачами в самоущільнювальному бетоні дозволяє зменшити витрати без істотної втрати міцності [6; 7].

Науковці О. Сікорський та Ю. Коваленко дослідили несучу здатність мостів в експлуатації, підкресливши значення матеріалів із підвищеною довговічністю [3]. У дослідженні Ч. Чжао (Z. Zhao) та ін. встановлено переваги вапнякового наповнювача над цегляним порошком за щільністю та водопоглинанням, але не було розглянуте їх спільне застосування [8].

Окрему увагу приділяють використанню нетрадиційної сировини. Так, М. Лю (M. Liu) та ін. аналізують гідратацію модифікованого цементу з використанням подрібненого пустельного піску та фіксують позитивний ефект на структуроутворення і щільність цементного каменю [9].

Серед вітчизняних досліджень доцільно згадати роботу А. Бондаря та та ін., в якій розглянуто перспективи використання вторинної мінеральної сировини у виробництві сухих будівельних сумішей. Дослідники підкреслюють економічну ефективність впровадження піску з відходів у цементні композити [1]. Разом із тим, М. Хамдаду та ін. (M. Hamdadou et al.) систематизували сучасні уявлення про допоміжні цементуючі матеріали, однак не надали розгорнутого аналізу щодо ролі піску та вапняку, що залишає місце для подальших розробок [10]. Також науковці А. Абдалкадер (A. Abdalqader) та М. Сонебі (M. Sonebi) подають результати дослідження, де порівнюють різні типи наповнювачів у складі цементних суспензій, констатуючи вищу стабільність сумішей із вапняковим наповнювачем порівняно з іншими матеріалами [11].

Незважаючи на широке представлення теми у світовій літературі, в оглянутих працях відсутнє системне вивчення комбінованого впливу піску та вапняку на параметри в'яжучих матеріалів за умов використання саме локальної сировини, що потребує подальших досліджень.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є наукове обґрунтування доцільності й ефективності використання піску та вапняку як функціональних наповнювачів у складі модифікованих цементних в'яжучих сумішей для підвищення їх структурно-механічних характеристик, довговічності та реологічних властивостей із урахуванням специфіки локальної сировинної бази. Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. Дослідити фізико-хімічні властивості та структурну роль піску і вапняку в процесах формування структури цементного каменю за умов їх комбінованого використання.

2. Проаналізувати вплив різного співвідношення наповнювачів на показники міцності, водопоглинання, усадки та тиксотропії модифікованих цементних сумішей, використовуючи стандартизовані методи випробування.

3. Сформулювати рекомендації щодо раціонального складу та технологічних режимів застосування піску і вапняку як функціональних компонентів цементних в'яжучих сумішей для підвищення їх експлуатаційних характеристик у будівельній практиці.

Викладення основного матеріалу дослідження

Пісок у цементних сумішах зазвичай виступає інертним мінеральним заповнювачем, оскільки його основний компонент (переважно кварц) не реагує з гідратними продуктами цементу. Середній розмір частинок піску достатньо великий, тому пісок покращує скелетний об'єм суміші і, завдяки ширшому градаційному розподілу, знижує водопоглинання суміші (фізичний ефект пакування). Водночас надмірна кількість великих часток піску зменшує загальний питомий об'єм порожнин, а його «грубіша» структура сприяє зниженню водо-потреби суміші [3; 9].

Натомість вапняковий наповнювач (головним чином $CaCO_3$) є дрібним мінеральним компонентом із великою питомою поверхнею. Він практично не гідролізується та не містить значної хімічної активності (практично інертний), але може виявляти фізико-хімічні ефекти. Зокрема, частинки кальциту можуть вступати у реакцію з алюмінатною складовою цементу із утворенням карбоалюмінатів (моно- і гексакарбоалюмінат). Таким чином, вапняковий наповнювач може частково прискорювати гідратацію та модифікувати мікроструктуру цементного каменю (стимулюючи утворення C—S—H та наявних AFm–фаз) [5]. Крім того, вапняковий пил доповнює недолік дрібнодисперсних фракцій у стандартному портландцементі, покращуючи ущільнення структури суміші та стабільність рухомого розчину. У таблиці 1 відображено порівняльні фізико-хімічні характеристики піску та вапняку за даними літературних джерел.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика піску та вапнякового наповнювача як функціональних складових цементних в'яжучих сумішей

Показник	Пісок	Вапняковий наповнювач
Головний компонент	Кварц (SiO_2) та інші силікати (нереактивні)	Кальцит ($CaCO_3$) (практично інертний або слабоактивний)
Фракція та форма зерен	Грубий (зазвичай 0,1–2 мм), переважно округлі або кутасті	Тонкодисперсний порошок (<0,063 мм), нерівні частинки
Специфічна поверхня	Відносно мала	Велика (висока адсорбуюча здатність)
Хімічна активність у суміші	Практично нульова (чиста наповнювальна дія)	Дуже низька (формування невеликої кількості карбоалюмінатів)
Вплив на гідратацію	Не змінює гідратацію (фізичний ефект пакування)	Може дещо прискорювати гідратацію за рахунок нуклеації і реакції $CaCO_3$ (утворення C—S—H та AFm)
Вплив на текучість і стабільність	Скорочує водоцементне відношення (низька адсорбція), покращує осадку суміші	Збільшує в'язкість та опір розтікання (через високу питому поверхню)
Роль у структурі матеріалу	Формує каркасну структуру затверділого в'яжучого	Заповнює мікропори, підвищує щільність і міцність матриці

Джерело: узагальнено автором на основі даних [3; 5; 9; 11; 13].

Співвідношення піску та вапнякового наповнювача в суміші суттєво впливає на її властивості. Збільшення частки грубозернистого піску (за інших рівних умов) призводить до поліпшення текучості та зменшення необхідної витрати води. Зокрема, в дослідженні [10] встановлено, що застосування щільних кварцових пісків із більшим вмістом окатишів (кар'єрний пил чи відходи дроблення) помітно підвищує рухливість розчинів без суттєвих втрат міцності. Водночас надмірне збільшення частки піску може знизити міцні характеристики через погіршення зв'язку волоконного цементного каменю.

Щодо характеристик міцності, то вміст наповнювачів у межах 10–20 % від маси цементу має незначний негативний вплив на міцність через «ефект розведення» цементного каменю [5]. Так, при заміні до 50–100 % традиційного вапнякового наповнювача на аналогічний за об'ємом шлаковий або білий кременистий заповнювач, втрати міцності на 7-й день становили лише 5–10 %, тоді як через 28 діб міцність компенсувалася і вирівнювалася. Подібно, в дослідженні [10] зафіксовано, що кінцева (28-денна) міцність цементного розчину практично не змінюється при частковому введенні вапнякового пилу чи інших подібних наповнювачів, якщо правильно скориговані реологічні показники. У таблиці 2 викладено результати аналізу по параметрам суміші та порівняння зростання частки піску і вапнякового пилу.

Таблиця 2

Вплив співвідношення піску та вапнякового наповнювача на основні технологічні та характеристики міцності цементних сумішей

Параметр суміші	Зростає частка піску	Зростає частка вапнякового пилу
Текучість/осадка	Зростає (краща плинність); потреба води зменшується (грубі фракції)	Зменшується (підвищується межа текучості); для сталої осадки потрібні добавки
В'язкість/рухливість	Знижена (низька питома поверхня)	Збільшується (висока поверхня часток)
Необхідність пластифікаторів	Менша (покращена природна плинність)	Вища (для збереження потрібної консистенції)
Міцність на стиск	Знижується незначно через більший об'єм інертних фракцій; може компенсуватися підвищеною ущільненістю	Знижується (електричний «ефект розведення» цементу) при дуже високих дозах; разом із тим, до 20 % заміни цементу втрати мінімальні
Довговічність та усадка	Довговічність зазвичай не погіршується; висока щільність може зменшувати усадку	Довговічність часто покращується (щільніший композит); за деякими даними зменшує усадку
Економічний ефект	Зниження витрат на цемент (до 10–20 % заміни)	Зниження витрат на цемент (можливий замісник цементу, до 15–20 %)

Джерело: узагальнено автором на основі даних [1; 5; 8; 10; 13].

На основі проведеного аналізу сформульовано деякі практичні рекомендації щодо раціонального використання піску та вапнякового наповнювача у складі модифікованих цементних в'яжучих сумішей. По-перше, оптимальним вважається дозування вапнякового наповнювача у межах 10–20 % від маси цементу, що забезпечує належну міцність і структурну щільність без надмірного зниження технологічних властивостей суміші. Зокрема, введення до 15 % осадового пустельного піску у вигляді мінеральної добавки дозволяє досягнути понад 75 % міцності еталонного складу на 28-й день, при цьому зберігається інтенсивність набору міцності на пізніших строках [9]. Водночас перевищення дозування понад 30 % обумовлює необхідність регулювання водоцементного співвідношення задля компенсації негативного впливу на реологічні властивості суміші.

По-друге, суттєвого значення набуває контроль параметрів вологовмісності, зокрема зважаючи на високу питому поверхню вапнякового пилу, що призводить до зростання потреби в суперпластифікаторах для забезпечення проєктної консистенції. У дослідженні [3] доведено, що підвищення частки вапнякового наповнювача у складі спричиняє зростання необхідності в хімічних добавках для збереження показника осідання на заданому рівні. Відповідно, доцільно впроваджувати водоредукуючі добавки та знижувати водоцементне співвідношення для забезпечення технологічної однорідності.

По-третє, на підставі сучасних досліджень рекомендовано ширше застосовувати нестандартну мінеральну сировину, зокрема пустельний пісок, шлакові шлами, відходи кар'єрного вапняку, а також побічні продукти цементного виробництва. Так, введення до 15–20 % вапнякового пилу як заміни цементу не лише не погіршує експлуатаційних характеристик, але і сприяє зниженню вуглецевого сліду, що відповідає сучасним вимогам до екологічної безпеки будівельних технологій [8]. За умови належного фракційного підбору навіть некондиційний кварцовий пісок може бути повноцінним заповнювачем, зберігаючи щільність і тріщиностійкість матеріалу [12].

Також системний підхід до комбінування піску та вапняку у в'яжучих сумішах передбачає досягнення балансу між технологічністю, міцністю й економічністю. Послідовне підвищення вмісту вапнякового та піщаного наповнювачів при належній компенсації складу дозволяє скоротити витрати цементу без критичного погіршення показників кінцевої міцності [4]. Додатково рекомендовано поєднувати зазначені наповнювачі з кальцієвмісними матеріалами або мікродисперсними активними домішками для покращення водопоглинання, усадкової стійкості та довговічності модифікованих композицій.

Висновки

Проблема вдосконалення цементних в'яжучих сумішей шляхом упровадження природних мінеральних наповнювачів, зокрема піску та вапняку, залишається актуальною в умовах необхідності зниження ресурсної енергоємності, підвищення довговічності та покращення реологічних властивостей будівельних композитів. Проведене дослідження дозволяє зробити низку висновків відповідно до поставлених у дослідженні завдань.

По-перше, встановлено, що пісок у поєднанні з вапняком чинить комплексний фізико-хімічний вплив на структуру цементного каменю, оскільки пісок формує каркасну структуру, знижує водопотребу та покращує щільність суміші, а вапняковий наповнювач бере участь у реакціях із алюминатними фазами цементу, утворюючи карбоалюмінати та прискорюючи гідратацію. По-друге, виявлено, що оптимальне співвідношення наповнювачів дозволяє регулювати тиксотропні властивості, мінімізувати усадку та забезпечити високі показники міцності при зниженому вмісті цементу. За дотримання дозування в межах 10–20 % для вапнякового пилу та до 30 % для піску негативний вплив на механічні характеристики є мінімальним або взагалі компенсується. По-третє, сформульовано практичні рекомендації щодо застосування нетрадиційної сировини, зокрема пустельного піску, вапнякових відходів та пилу кар'єрів, із урахуванням необхідності корекції водоцементного співвідношення та введення хімічних добавок для досягнення бажаних властивостей.

Здобуті результати мають як теоретичне, так і прикладне значення. Вони можуть бути застосовані при розробці рецептур сухих будівельних сумішей, бетону самоущільнювального типу, тонкошарових оздоблювальних матеріалів і спеціалізованих будівельних розчинів для інженерних споруд. Запропоновані співвідношення компонентів та умови їх використання дозволяють зменшити витрати цементу, скоротити викиди CO_2 і підвищити технологічність композицій без суттєвого погіршення експлуатаційних характеристик. Наукова новизна проведеного дослідження полягає в системному узагальненні ефектів одночасного використання піску та вапнякового наповнювача, що раніше розглядалися переважно ізольовано, а практична цінність полягає у можливості адаптації результатів під конкретні регіональні сировинні ресурси. Подальші дослідження мають бути спрямовані на експериментальне підтвердження оптимальних параметрів сумішей, вивчення тріщиностійкості та довговічності в умовах реального довготривалого навантаження, а також на створення багатокомпонентних систем із включенням інших мікронаповнювачів для досягнення синергетичного ефекту.

Список використаної літератури

1. Перспективи використання вторинних відходів будівельної галузі у виробництві сухих будівельних сумішей / А. Бондар та ін. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2024. Т. 36. № 1. С. 64–70. URL: https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-64-70 (дата звернення: 08.06.2025).

2. Коваленко С., Клименко А., Коваленко Ю. Залізобетонні конструкції: допоміжні цементуючі матеріали. Огляд. *Композиційні матеріали* : збірник тез XIII Міжнар. наук.-практ. WEB-конф. (м. Київ, 26–29 квіт. 2024 р.). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2024. С. 171–183. URL: https://cmmiwc.kpi.ua/article/view/302721/294845 (дата звернення: 08.06.2025).

3. Сікорський О., Коваленко Ю. Моніторинг несучої здатності мостових конструкцій в періоді експлуатації. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 349. № 2. С. 272–277. URL: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-40 (дата звернення: 08.06.2025).

4. Limestone filler as a mineral additive on the compressive strength and durability of self-compacting concrete with limestone manufactured sand / Z. Jiang et al. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 94. Article 109965. URL: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109965 (дата звернення: 08.06.2025).

5. Nécira B., Abadou Y. Properties of self-compacting mortar made with various mineralogical sources different types of sands and fillers. *World Journal of Engineering*. 2021. Vol. 18. No. 6. P. 861–869. URL: https://doi.org/10.1108/WJE-10-2020-0483 (дата звернення: 08.06.2025).

6. How quarry waste limestone filler affects the rheological behavior of cement-based materials / S. Safiddine et al. *Applied Rheology*. 2021. Vol. 31. No. 1. P. 63–75. URL: https://doi.org/10.1515/arh-2020-0118 (дата звернення: 08.06.2025).

7. Skender Z., Bali A., Kettab R. Self-compacting concrete (SCC) behaviour incorporating limestone fines as cement and sand replacement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2021. Vol. 25. No. 10. P. 1852–1873. URL: https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1607564 (дата звернення: 08.06.2025).

8. Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: Properties and durability / Z. Zhao et al. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. 102898. URL: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102898 (дата звернення: 08.06.2025).

9. Hydration and material properties of blended cement with ground desert sand / M. Liu et al. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 389. Article 131624. URL: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131624 (дата звернення: 08.06.2025).

10. Hydration, mechanical and transfer properties of blended cement pastes and mortars prepared with recycled powder or limestone filler / M. Hamdadou et al. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 78. Article 107541. URL: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107541 (дата звернення: 08.06.2025).

11. Assessment of the influence of the type of filler materials on the properties of cement grouts / A. Abdalqader et al. *Construction Technologies and Architecture*. 2022. Vol. 1. P. 171–178. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.171 (дата звернення: 08.06.2025).

12. Reuse of untreated fine sediments as filler: is it more beneficial than incorporating them as sand? / H. Beddaa et al. *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 2. Article 211. URL: https://doi.org/10.3390/buildings12020211 (дата звернення: 08.06.2025).

13. Парфентьєва І., Верешко В., Гусачук Д. Основи та фундаменти: навч. посіб. для студентів спец. 192 «Будівництво та цивільна інженерія». Луцьк: Луцький нац. техн. ун-т, 2017. 296 с. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/Навчальний%20посібник%20Основи%20та%20фундаменти.pdf (дата звернення: 10.06.2025).

References

1. Bondar, A., Khrystych, O., Bondar, O., & Safronenko, I. (2024). Perspektyvy vykorystannia vtotynnykh vidkhodiv budivelnoi haluzi u vyrobnytstvi sukhykh budivelnykh sumishei [Prospects for the use of secondary

construction industry waste in the production of dry building mixtures]. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi – Modern Technologies, Materials and Structures in Construction*, 36(1), 64–70. Retrieved from https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-64-70 [in Ukrainian].

2. Kovalenko, S., Klymenko, A., & Kovalenko, Yu. (2024). Zalizobetonni konstruktsii: dopomizhni tsementuiuchi materialy. Ohliad [Reinforced concrete structures: auxiliary cementing materials. Review]. *Kompozytsiini materialy – Composite Materials*, p. 171–183. Retrieved from https://cmmiwc.kpi.ua/article/view/302721/294845 [in Ukrainian].

3. Sikorskyi, O., & Kovalenko, Yu. (2025). Monitorynh nesuchoi zdatnosti mostovykh konstruktsii v periodi ekspluatatsii [Monitoring of load-bearing capacity of bridge structures during operation]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 349(2), 272–277. Retrieved from https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-40 [in Ukrainian].

4. Jiang, Z., Yang, Q., Wang, B., Li, C., Zhang, J., & Ren, Q. (2024). Limestone filler as a mineral additive on the compressive strength and durability of self-compacting concrete with limestone manufactured sand. *Journal of Building Engineering*, 94, Article 109965. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109965 [in English].

5. Nécira, B., & Abadou, Y. (2021). Properties of self-compacting mortar made with various mineralogical sources different types of sands and fillers. *World Journal of Engineering*, 18(6), 861–869. Retrieved from https://doi.org/10.1108/WJE-10-2020-0483 [in English].

6. Safiddine, S., Amokrane, K., Debieb, F., Soualhi, H., Benabed, B., & Kadri, E. (2021). How quarry waste limestone filler affects the rheological behavior of cement-based materials. *Applied Rheology*, 31(1), 63–75. Retrieved from https://doi.org/10.1515/arh-2020-0118 [in English].

7. Skender, Z., Bali, A., & Kettab, R. (2021). Self-compacting concrete (SCC) behaviour incorporating limestone fines as cement and sand replacement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25(10), 1852–1873. Retrieved from https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1607564 [in English].

8. Zhao, Z., Grellier, A., Bouarroudj, M., Michel, F., Bulteel, D., & Courard, L. (2021). Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: Properties and durability. *Journal of Building Engineering*, 43, Article 102898. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102898 [in English].

9. Liu, M., Liu, E., Hao, J., Di Sarno, L., & Xia, J. (2023). Hydration and material properties of blended cement with ground desert sand. *Construction and Building Materials*, 389, Article 131624. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131624 [in English].

10. Hamdadou, M., Bignonnet, F., Deboucha, W., Ranaivomanana, H., Leklou, N., & Arroudj, K. (2023). Hydration, mechanical and transfer properties of blended cement pastes and mortars prepared with recycled powder or limestone filler. *Journal of Building Engineering*, 78, Article 107541. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107541 [in English].

11. Abdalqader, A., Sonebi, M., Thornton, N., & Taylor, S. (2022). Assessment of the influence of the type of filler materials on the properties of cement grouts. *Construction Technologies and Architecture*, 1, 171–178. Retrieved from https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.171 [in English].

12. Beddaa, H., Ben Fraj, A., Lavergne, F., & Torrenti, J. M. (2022). Reuse of untreated fine sediments as filler: Is it more beneficial than incorporating them as sand? *Buildings*, 12(2), Article 211. Retrieved from https://doi.org/10.3390/buildings12020211 [in English].

13. Parfentieva, I., Vereshko, V., & Husachuk, D. (2017). Osnovy ta fundamenty: navch. posib. dlia studentiv spets. 192 "Budivnytstvo ta tsyvilna inzheneriia" [Foundations and substructures: Textbook for students majoring in 192 "Construction and Civil Engineering"]. *Lutsk: Lutskyy natsionalnyy tekhnichnyy universytet – Lutsk: Lutsk National Technical University*. Retrieved from https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-03/Навчальний%20посібник%20Основи%20та%20фундаменти.pdf [in Ukrainian].

УДК 621.311 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.24

І. Ф. ПОГРЕБНЯК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-0935-1168

Н. Л. ДОН
кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9503-5326

А. В. ЛЮБЕЗНИЙ
студент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0001-4355-5298

ВИЗНАЧЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕРЕЖЕВОЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ДАХОВОГО ТИПУ ДЛЯ ПЕРШОГО КОРПУСУ ХНТУ

У статті представлено результати моделювання роботи мережевої фотоелектричної станції дахового типу для першого корпусу Херсонського національного технічного університету та визначено доцільність впровадження такої системи на практиці.

При моделюванні було враховано, що конфігурація даху навчального корпусу є досить складною й різнорівневою, а також той факт, що проблема полягає в режимі роботи (вранішньо-денний режим) та сезонності роботи закладу вищої освіти (максимум споживання електроенергії не співпадає із сезоном максимуму сонячної інсоляції).

В програмному комплексі Gelioscope розроблено мережеву ФЕС дахового типу зі стаціонарною та одновісною слідкуючою системою ФЕМ. Зокрема, передбачена суцільна «фальш-скатна» конструкція з орієнтацією ФЕМ на південний-захід, кут нахилу модуля та одновісна слідкуюча система з блочно розташованими модулями фотоелектричної станції з орієнтацією на південь. Запропоновано п'ять варіантів, які були поділені на дві групи.

Проведено моделювання роботи всіх запропонованих варіантів проєкту, для кожного з яких визначено параметри складових системи мережевої ФЕС з урахуванням конфігурації даху об'єкту; підібрано обладнання для комплектації системи із врахуванням оптимального розташування ФЕБ за умови мінімального затінення елементів.

Розроблено електричну схему з'єднань елементів, отримано дані щодо продуктивності кожного з запропонованих варіантів із врахуванням втрат в системі. За результатами виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження мережевої ФЕС для даного об'єкту. На основі аналізу продуктивності проєктів запропоновано варіант використання системи за «зеленим» тарифом.

Ключові слова: *перший корпус ХНТУ, геліоенергетичний потенціал, мережева фотоелектрична станція дахового типу, моделювання роботи фотоелектричної станції, HelioScope.*

I. F. POGREBNIAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-0935-1168

N. L. DON
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-9503-5326

A. V. LIUBEZNYI
Student at the Department of Energy, Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0001-4355-5298

DETERMINATION OF THE FEASIBILITY OF IMPLEMENTING A ROOFTOP-TYPE GRID PHOTOELECTRIC STATION FOR THE FIRST BUILDING OF THE KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

The article presents the results of modeling the operation of a rooftop grid photovoltaic station for the first building of the Kherson National Technical University and determines the feasibility of implementing such a system in practice.

When modeling, it was taken into account that the configuration of the roof of the educational building is quite complex and multi-level, as well as the fact that the problem lies in the operating mode (morning-day mode) and seasonality of the higher education institution's operation (maximum electricity consumption does not coincide with the season of maximum solar insolation).

In the Gelioscope software complex, a rooftop grid photovoltaic station with a stationary and single-axis tracking system of photovoltaic modules has been developed. In particular, a solid «false-sloping» structure with the orientation of photovoltaic modules to the southwest, the angle of inclination of the module and a single-axis tracking system with block-positioned photovoltaic modules oriented to the south are provided. Five options were proposed, which were divided into two groups.

The operation of all proposed project options was simulated, for each of which the parameters of the components of the grid photovoltaic station system were determined taking into account the configuration of the roof of the facility; equipment was selected to complete the system, taking into account the optimal location of photovoltaic batteries with minimal shading of the elements.

An electrical diagram of the elements was developed, data on the performance of each of the proposed options was obtained, taking into account losses in the system. Based on the results, a feasibility study was performed on the feasibility of implementing a grid photovoltaic station for this facility. Based on the analysis of the performance of the projects, a variant of using the system at a «green» tariff was proposed.

Key words: *the first building of KhNTU, solar energy potential, rooftop grid photovoltaic station, modeling of the operation of a photovoltaic station, HelioScope.*

Постановка проблеми

За своїм геліопотенціалом Херсонська область посідає одну з перших позицій в Україні. Кількість сонячних днів на рік сягає 65 % тривалості року. Середня сонячна інсоляція на території м. Херсон – 1250 кВт·год/м^2 рік. Особливості географічних та кліматичних умов Херсонської області створюють сприятливі умови для розвитку відновлюваної енергетики (ВДЕ). Станом на 2021 рік в області вже було збудовано 32 сонячні фотоелектричні станції потужністю 272,1 МВт, що забезпечило залучення понад 10 млрд грн інвестицій. При цьому приватного інвестора головним чином цікавить ефективність і економічність запровадженої системи [1–3].

З іншого боку, раціональне та ефективне, з економічної точки зору, впровадження ВДЕ потребує детального попереднього аналізу. Моделювання роботи системи генерації електроенергії дозволяє достатньо ефективно прорахувати можливі конфігурації системи та обрати найраціональнішу згідно до необхідних критеріїв [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Будівля першого навчального корпусу Херсонського національного технічного університету (ХНТУ) (м. Херсон, Бериславське шосе 24) окрема, конфігурація даху навчального корпусу є досить складною, різнорівневою (рис. 1). Дах будівлі плоского типу, в задовільному технічному стані (рис. 2).

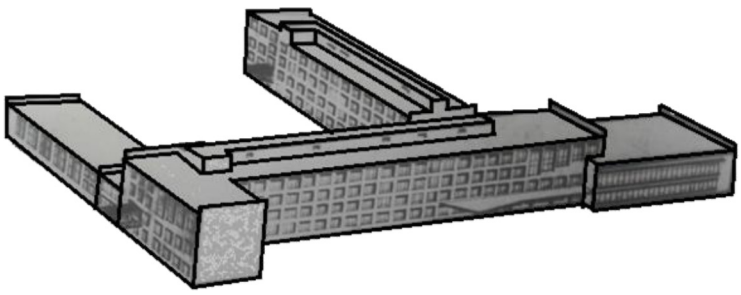


Рис. 1. Схематичне зображення будівлі І корпусу ХНТУ



Рис. 2. Фото даху будівлі І корпусу ХНТУ

Аналіз споживання електроенергії першим навчальним корпусом ХНТУ в розрізі «доковідних» років (2017–2018 роки) показав (рис. 3), що з урахуванням споживання електроенергії об'єктом слід розглянути варіант мережевої фотоелектричної станції (ФЕС) дахового типу під «зелений тариф».

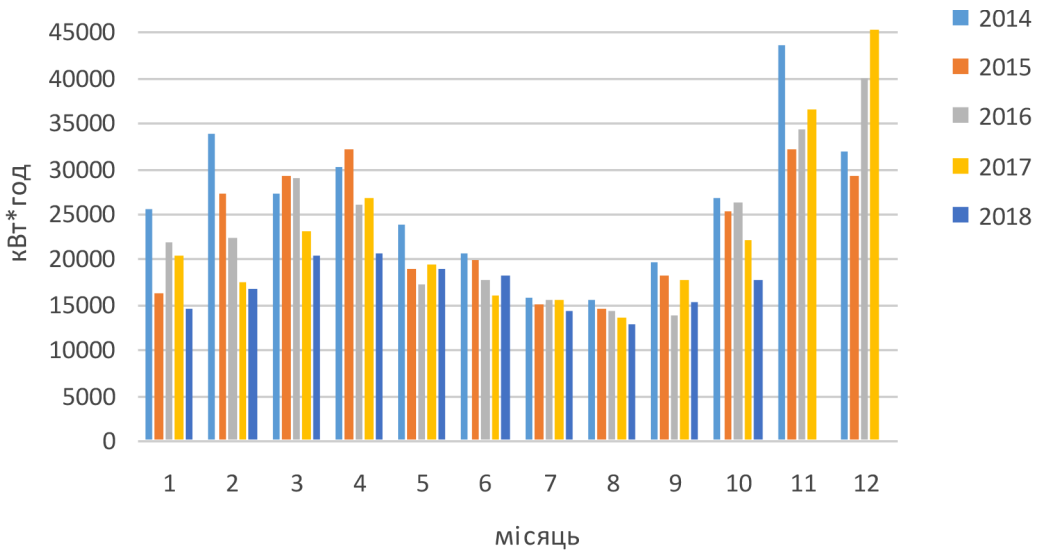


Рис. 3. Структура споживання електроенергії І корпусом ХНТУ за 2017–2021 роки

Проблема полягає в режимі роботи (вранішньо-денний режим) та сезонності роботи закладу вищої освіти (максимум споживання електроенергії не співпадає із сезоном максимуму сонячної інсоляції).

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є визначення доцільності впровадження мережевої фотоелектричної станції дахового типу для першого корпусу Херсонського національного технічного університету.

Викладення основного матеріалу дослідження

Техніко-економічне обґрунтування проєкту фотоелектричної станції вимагає знання інсоляції в регіоні [2]. Метеодані, які використовуються сучасними програмними пакетами для моделювання роботи сонячних фотоелектричних станцій, мають значну перевагу, оскільки автоматично «підтягують» дані з метеостанцій як мінімум, за десять років із врахуванням статистичної обробки та зміни клімату в конкретній точці планети. Тоді як розрахунки «вручну», які часто спираються на застарілі дані довідників, не враховують ані змін клімату, ані перепадів висоти над рівнем моря [2, 4].

В програмному пакеті PVSyst [5] для кліматичних умов м. Херсона визначено надходження сумарної та дифузної сонячної радіації на горизонтальну поверхню (рис. 4), визначено залежність коефіцієнта перерахунку з горизонтальної поверхні на похилу від кута нахилу приймальної поверхні до горизонту для широти φ = 46,67° (рис. 5).

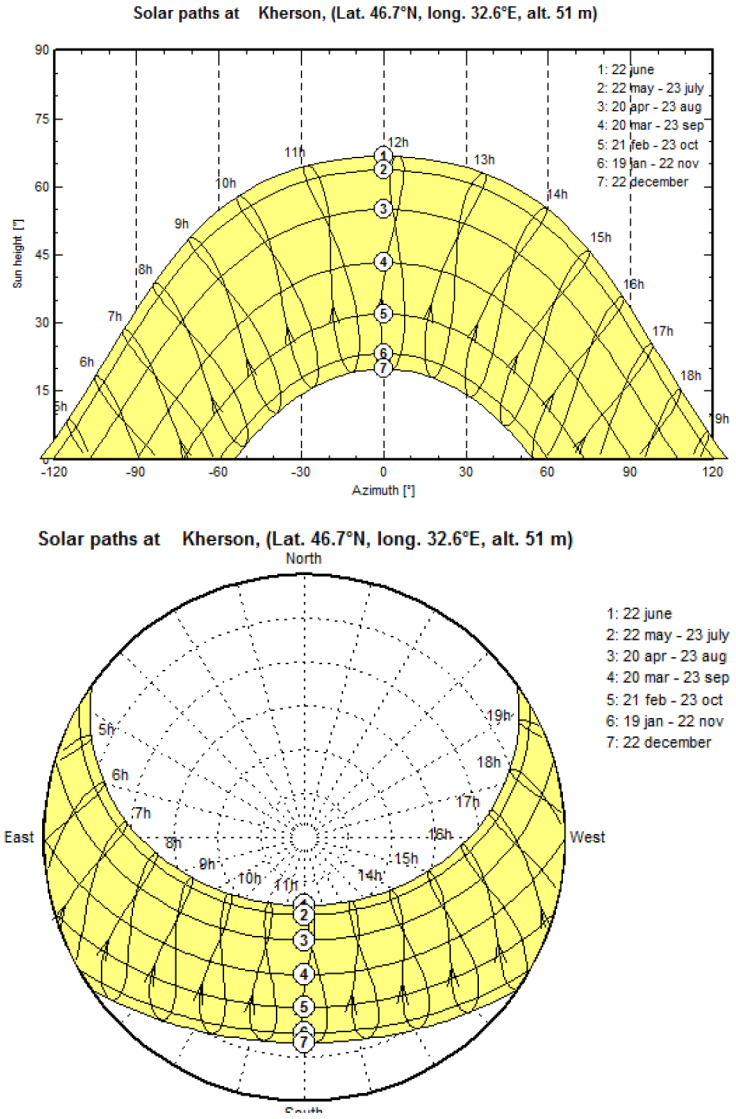


Рис. 4. Середнє значення сонячного шляху на широті Херсона

отримано авторами моделюванням в PVSyst [5]

Для попередньої оцінки проєкту мережевої фотоелектричної станції дахового типу були прийняті фотоелектричні модулі Trina Solar потужністю 320 Вт · пік та статичний перетворювач електроенергії постійного струму в змінний (інвертор) Sunny Tripower 24000TL-US виробництва SMA America.

В програмному комплексі Gelioscope [6] розроблено мережеву фотоелектричну станцію дахового типу зі стаціонарною та одновісною слідкуючою системою фотоелектричних модулів (ФЕМ). Зокрема, передбачена суцільна «фальш-скатна» конструкція з орієнтацією ФЕМ на південний-захід, кут нахилу модуля та одновісна слідкуюча система з блочно розташованими модулями ФЕС з орієнтацією на південь:

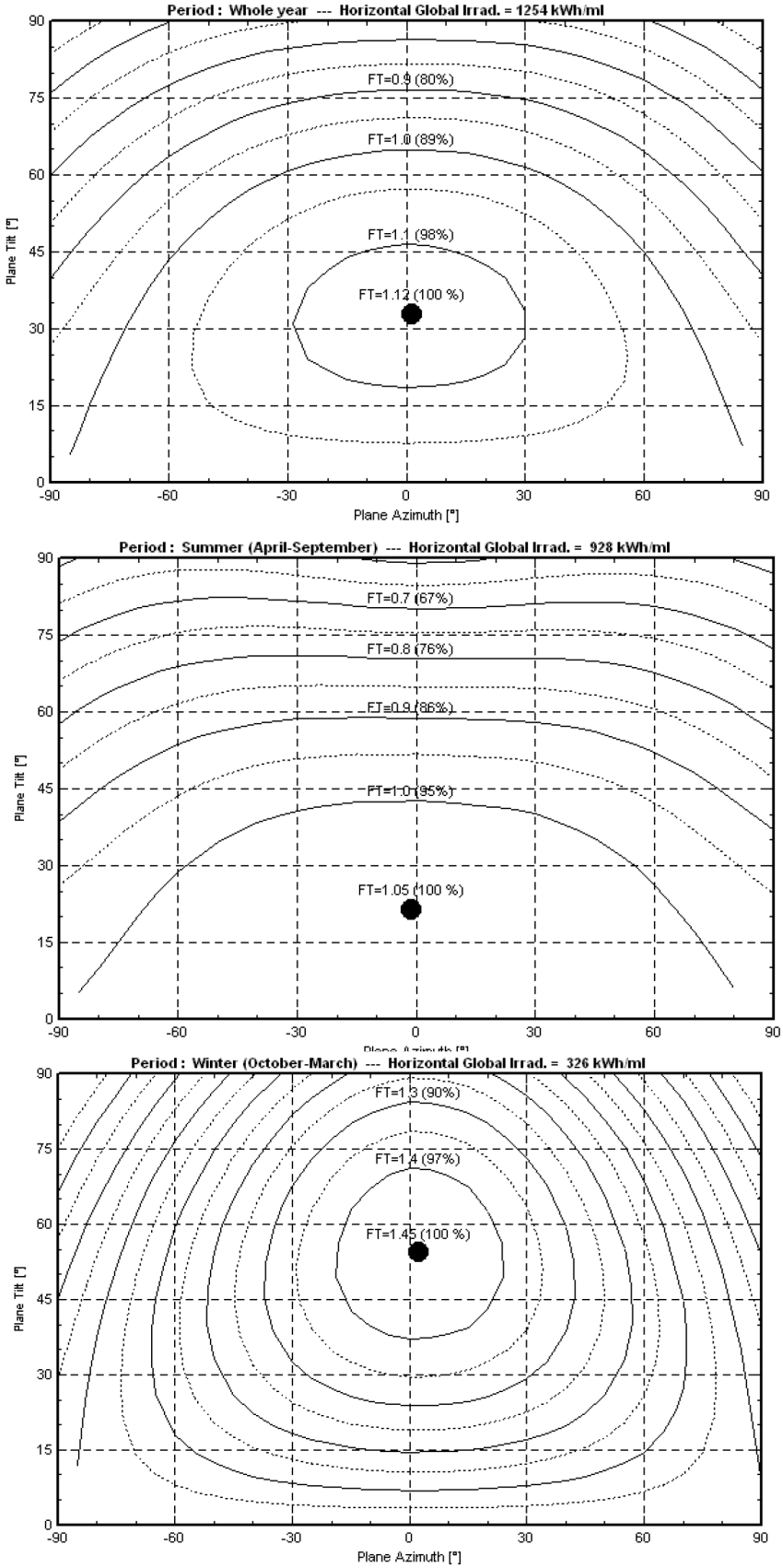


Рис. 5. Коефіцієнт перерахунку з горизонтальної поверхні на похилу для м. Херсон (при фіксованому річному та сезонному розташуванні поверхні)

отримано авторами моделюванням в PVSyst [5]

– варіант 1 – суцільна «фальш-скатна» конструкція з орієнтацією ФЕМ на південний-захід, кут нахилу модуля 20°;
– варіант 2 – суцільна «фальш-скатна» конструкція з орієнтацією ФЕМ на південний-захід, кут нахилу модуля 34°;
– варіант 3 – суцільна «фальш-скатна» конструкція з орієнтацією ФЕМ на південний-захід, кут нахилу модуля 46,6°.
– варіант 4 – одновісна слідкуюча конструкція з орієнтацією ФЕМ на південь, кут нахилу модуля 20°;
– варіант 5 – одновісна слідкуюча конструкція з орієнтацією ФЕМ на південь, кут нахилу модуля 34°.

Даний перелік варіантів проєкту фактично можна поділити на дві основні групи, оскільки варіанти 1–3 та 4–5 відповідно відрізняються лише кутом встановлення ФЕБ. Поміж собою дві групи варіантів відрізняються насамперед принципом проєктування: варіанти 1–3 максимально використовують існуючу поверхню даху з мінімізацією витрат при очікуванні максимуму потужності. Варіанти 4–5 через використання трекерів мають визначити компроміс поміж ціною системи та її потужністю.

В Gelioscope [6] для кожного варіанту визначено параметри складових системи мережевої ФЕС з урахуванням конфігурації даху об'єкту; підібрано обладнання для комплектації системи із врахуванням оптимального розташування ФЕБ за умови мінімального затінення елементів (рис. 6).

Моделюванням в в Gelioscope [6] розроблено електричну схему з'єднань елементів, визначено структуру втрат в системі, що враховує втрати в інверторах, втрати в мережі постійного струму, втрати в мережі змінного струму,

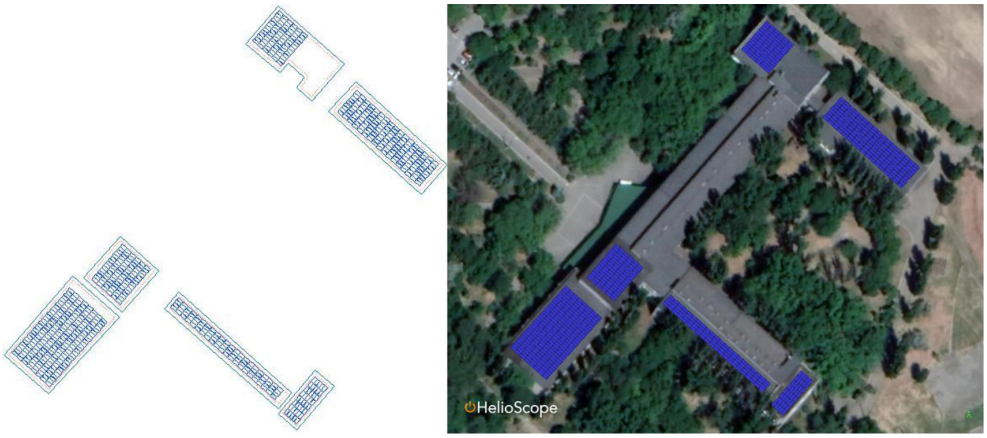


Рис. 6. План-схема розташування ФЕМ (варіант 1) [1]

отримано авторами моделюванням в Gelioscope [6]



Рис. 7. Моделювання затінення ФЕМ (варіант 1)

отримано авторами моделюванням в Gelioscope [6]

втрати через затінення чи забруднення ФЕМ, зменшення потужності фотоелектричного модуля через його перегрівання (рис. 7).

В програмному комплексі Gelioscope [6] проведено моделювання роботи кожного із варіантів мережевої фотоелектричної станції дахового типу для І корпусу ХНТУ, отримано дані щодо продуктивності кожного з них із врахуванням втрат в системі (рис. 7).

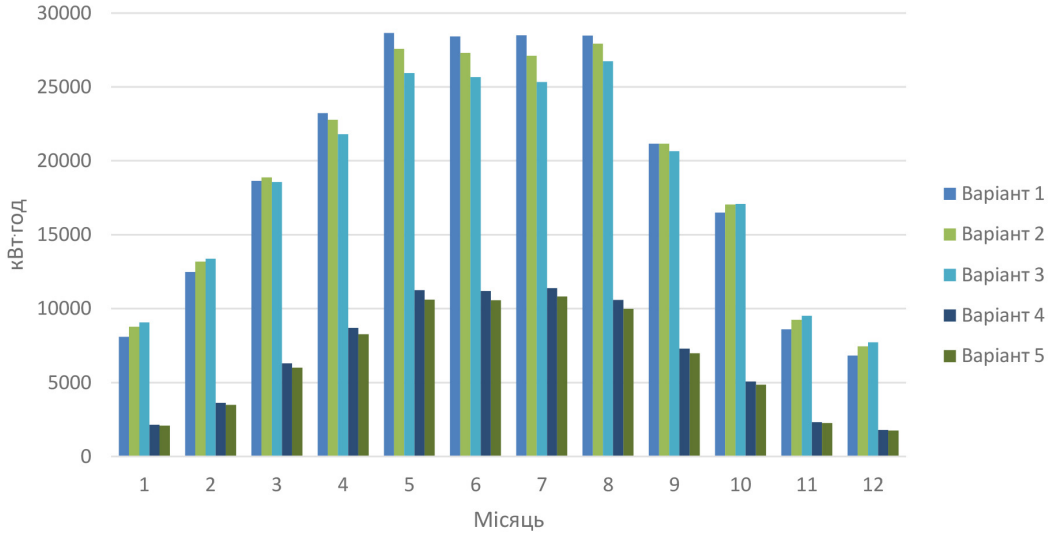


Рис. 8. Порівняльна характеристика варіантів проєкту ФЕС

Порівнянням видачі в мережу потужності за варіантами із середнім споживанням електроенергії І корпусом ХНТУ, визначено обсяг електроенергії, яку ФЕС може продати за «Зеленим тарифом» (якщо ХНТУ, як юридична особа, оформить ліцензію на продаж електроенергії за «Зеленим тарифом»).

Як видно з рис. 9, варіанти 1–3 протягом літнього сезону (травень-вересень) здатні не лише перекрити власне споживання електроенергії об'єктом, а й видати надлишок до мережі. Покриття частини витрат власним виробітком електроенергії мережевою фотоелектричною станцією дахового типу І корпусу ХНТУ насамперед зумовить економію коштів на оплату споживання електроенергії.

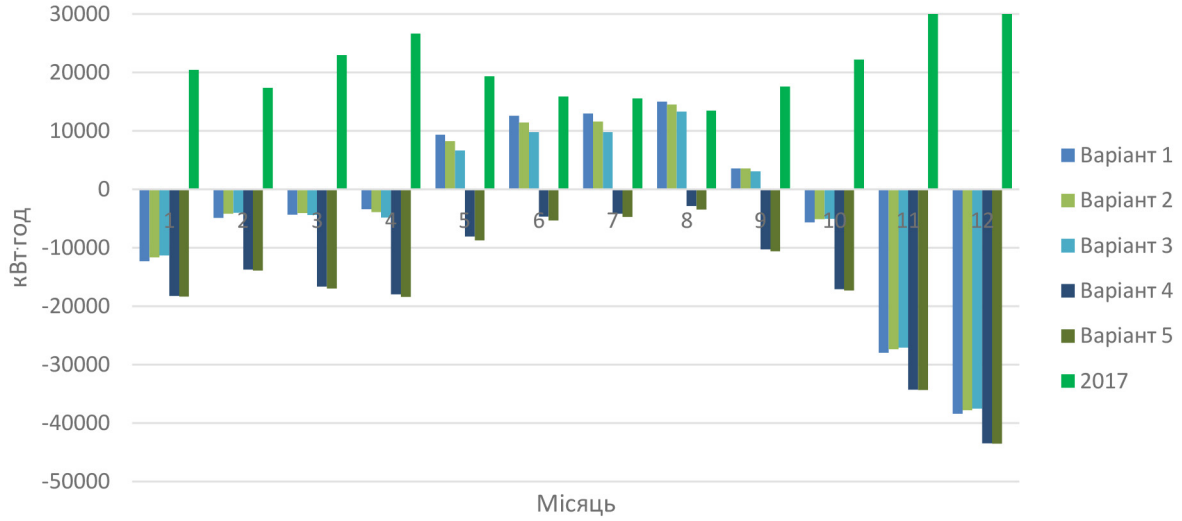


Рис. 9. Баланс потужності проєкту ФЕС з видачею надлишку в мережу за «Зеленим тарифом»

Визначено капітальні та поточні витрати на реалізацію розроблених варіантів проєкту мережевої сонячної електростанції дахового типу для першого корпусу ХНТУ. Термін окупності найбільш ефективного варіанту 1 мережевої фотоелектричної станції дахового типу для продажу електроенергії за «Зеленим тарифом» склав 4,7 років; *ІД* = 1,2 > 1. Показники ефективності проєкту свідчать про доцільність впровадження його в дію.

Висновки

Отже, результати моделювання в програмному комплексі Gelioscope роботи мережевої фотоелектричної станції дахового типу для першого корпусу Херсонського національного технічного університету підтверджують, що за умови відповідного фінансового забезпечення можливо даною системою не лише частково покривати власне споживання електроенергії, а й продавати надлишки за «Зеленим тарифом», що свідчить про доцільність впровадження такої системи на практиці.

Список використаної літератури

1. Статистика розвитку відновлюваної електроенергетики на кінець І півріччя 2021 року. URL:https://www.kmu.gov.ua/news/statistika-rozvitku-vidnovlyuvanoyi-elektroenergetiki-na-kinec-i-pivrichchya-2021-roku (дата звернення: 20.04.2025).

2. Методичні рекомендації оцінки економічної ефективності інвестицій в енергозберігаючі проєкти на підприємствах житлово-комунального господарства: // Наказ Колегії державного комітету України з питань житлово-комунального господарства (Держжитлокомунгосп) від 14.12.2007 р. № 218.

3. Don N., Pogrebniak I., Chepelyuk O., Varenyk K., Haiko O. Simulation modeling of the operation of an industrial grid-connected photovoltaic power plant of ground type. Actual Problems Of Modern Science 2024. Bydgoszcz–Khmelnytskyi, 2024. P. 130–139.

4. Інструменти для моделювання сонячних електростанцій. URL: https://avenston.com/articles/performance-modeling-tools-overview/ (дата звернення: 17.04.2025).

5. PVsyst photovoltaic software. URL: https://www.pvsyst.com/pvsystcli/ (дата звернення: 12.04.2025).

6. HelioScope | Commercial Solar Software. URL: https://helioscope.aurorasolar.com/ (дата звернення: 20.04.2025).

References

1. Statistics on the development of renewable electricity as of the end of the first half of 2021. URL:https://www.kmu.gov.ua/news/statistika-rozvitku-vidnovlyuvanoyi-elektroenergetiki-na-kinec-i-pivrichchya-2021-roku (last access: 20.04.2025). Title from the screen.

2. Methodological recommendations for assessing the economic efficiency of investments in energy-saving projects at housing and communal services enterprises: // Order of the Board of the State Committee of Ukraine for Housing and Communal Services (SDHK) dated 14.12.2007 No. 218.

3. Don N., Pogrebniak I., Chepelyuk O., Varenyk K., Haiko O. Simulation modeling of the operation of an industrial grid-connected photovoltaic power plant of ground type. Actual Problems Of Modern Science 2024. Bydgoszcz–Khmelnytskyi, 2024. P. 130–139.

4. Tools for modeling solar power plants. URL: https://avenston.com/articles/performance-modeling-tools-overview/ (last access: 17.04.2025). Title from the screen.

5. PVsyst photovoltaic software. URL: https://www.pvsyst.com/pvsystcli/ (last access: 12.04.2025). Title from the screen.

6. HelioScope | Commercial Solar Software. URL: https://helioscope.aurorasolar.com/ (last access: 20.04.2025). Title from the screen.

УДК 667.021.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.25

В. Е. ПРИХОДЬКО
аспірант кафедри транспортних технологій
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0002-7582-1693

ЗНАХОДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ІНДЕКСУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ І ТРАНСПОРТНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОПОЇЗДІВ ДЛЯ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У роботі запропоновано, розроблено та обґрунтовано експертно-функціональну модель оцінювання енергетичної і транспортної ефективності, призначену для оптимального вибору одноланкових автопоїздів, які залучаються до здійснення міжнародних перевезень вантажів транспортними коридорами США та Україна – ЄС. Основна ідея дослідження полягає у визначенні інтегрального індексу ефективності функціонування автопоїзда на основі системного підходу з урахуванням широкого спектра факторів, що впливають на енергетичну та транспортну складові експлуатації.

Модель базується на декомпозиції функціонально-експлуатаційних характеристик, що дозволяє виокремити окремі чинники енергетичної та транспортної ефективності. Такий підхід дає змогу детально проаналізувати структуру і взаємозв'язки між параметрами, що визначають раціональність використання конкретних конфігурацій автопоїздів у різних умовах експлуатації. Задля кількісного оцінювання ефективності застосовується інтегральний індекс, сформований у вигляді зваженої лінійної комбінації визначених показників. При цьому значення вагових коефіцієнтів для кожного з чинників визначаються за допомогою методу аналітичної ієрархії Т. Саамі, що забезпечує математичну обґрунтованість та об'єктивність вибору.

Розроблений критерій дозволяє враховувати проєктні параметри основних конструктивних елементів, технічні характеристики агрегатів і механізмів тягача та причепа, забезпечуючи високий рівень точності при прогнозуванні ефективності функціонування автопоїзда у системі міжнародних вантажних перевезень. Результати дослідження можуть бути використані для покращення транспортної логістики, оцінювання економічної доцільності автоперевезень та розробки політик сталого розвитку у сфері автомобільного транспорту.

Ключові слова: *автопоїзд, двигун, трансмісія, шасі, ходова частина, системи керування, ефективність, міжнародні перевезення.*

V. E. PRYKHODKO
Postgraduate Student at the Department of Transport Technologies
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-7582-1693

INTEGRAL INDEX EVALUATION OF ENERGY AND TRANSPORT EFFICIENCY IN ROAD TRAINS FOR INTERNATIONAL FREIGHT TRANSPORT

The paper proposes, develops, and substantiates an expert-functional model for evaluating energy and transport efficiency, intended for the optimal selection of single-link road trains involved in international freight transportation along the corridors of the USA and Ukraine–EU. The main idea of the study is to determine an integrated efficiency index for the operation of road trains using a systems approach, taking into account a wide range of factors influencing the energy and transport aspects of operation.

The model is based on the decomposition of functional-operational characteristics, which allows the identification of individual factors of energy and transport efficiency. This approach enables a detailed analysis of the structure and interrelationships between parameters that determine the rational use of specific road train configurations under various operating conditions. To provide a quantitative assessment of efficiency, an integral index is applied, formulated as a weighted linear combination of defined indicators. The weighting coefficients for each factor are determined using T. Saaty's Analytic Hierarchy Process (AHP), ensuring mathematical justification and objectivity in the selection process.

The developed criterion takes into account the design parameters of key structural elements, as well as the technical characteristics of the tractor and trailer units, ensuring a high level of accuracy in forecasting the operational efficiency of road trains in international freight transport systems. The research results can be used to improve transport logistics, assess the economic feasibility of road freight transportation, and support the development of sustainable transport policies.

Key words: *road train, engine, transmission, chassis, running gear, control systems, efficiency, international transportation.*

Вступ

За статистичними даними оглядів ринку міжнародних вантажних перевезень транспортними коридорами мережі Україна – ЄС зросла значущість засобів перевезення, розвитку альтернативних маршрутів доставки і урізноманітнення постачальників для забезпечення стабільності та надійності переміщення товарів. Ситуація, що склалася в галузі перевезення вантажів автомобільним транспортом, характеризується необхідністю постійного оновлення автомобілів-тягачів, причепів і напівпричепів особливо великої місткості. Для поповнення парку таких автотранспортних засобів шляхом імпорту слід більш повно враховувати міжнародний досвід. Це, перш за все, застосування у міжнародних і міжміських перевезеннях автомобільних поїздів збільшеної довжини, завантажувального об'єму та вантажності [1, 2]. При виборі транспортного засобу і комплектації автопоїзда для виконання міжнародних вантажних перевезень потрібно вирішувати велику кількість завдань із застосуванням складних математичних моделей. Для дослідження ефективності автопоїздів розроблено багато кількісних комплексних та узагальнених показників, які переважно, дозволяють оцінювати окремі частини автопоїзда. Проте, проблема вибору автопоїзда для виконання міжнародних вантажних перевезень, залишається актуальною.

Постановка проблеми

Розглянути задачу розроблення експертно-функціональної моделі обчислення інтегрального показника енергетичної та транспортної ефективності сучасних дизельних одноланкових автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження ефективності одноланкових автопоїздів, які описані у відкритих наукових джерелах, базуються на аналізі ключових параметрів, таких як: повна маса G_a (кг); потужність двигуна G_a (кВт); максимальна швидкість $V_{\max}$ (км/год); кліренс h (мм); колісна база L (мм); передавальне число трансмісії U; жорсткість підвіски k (Н/м); гальмівна сила F_{br} (Н) тощо [3]. За експлуатаційними властивостями, такими як тягово-швидкісні; гальмові; паливо-економічні; керованість; маневреність і прохідність, визначено характер руху одноланкового автопоїзда під час міжнародних вантажних перевезень, середню швидкість у конкретних умовах і продуктивність.

Зокрема розглядаються: динамічні моделі рушія одноланкового автопоїзда; вивчається взаємодія параметрів (наприклад, U, k) з коефіцієнтом корисної дії (ККД) колісного рушія; оптимізація розподілу крутних моментів: для багатовісних систем раціональний розподіл моментів між колесами залежить від положення центру мас, коефіцієнтів зчеплення та опору коченню; вплив деформованих поверхонь: аналізуються втрати енергії при русі на дорогах з різною кутовою жорсткістю, що впливає на вибір h та k [3–6, 8–12].

Науковці, які проводили дослідження на базі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) [1–4] спеціалізувалися на вивченні енергоефективності та динаміки транспортних засобів, зокрема одноланкових і багатоланкових автопоїздів. При удосконаленні конструкції, з метою підвищення енергоефективності автомобілів, основна увага приділялася підвищенню енергоефективності моторно-трансмісійних установок, гідродинамічним характеристикам, та впливу конструкційних характеристик ходової частини і, зокрема, окремих шин на енергетичні втрати в колісному рушію.

У Національному транспортному університеті під керівництвом професорів Хабутдінова Р. А. [5], Сахно В. П. [6] та Прокудіна Г. С. [7] розвиваються декілька напрямків досліджень у сфері міжнародних вантажних перевезень автопоїздами: математичне моделювання транспортних систем; технології підвищення ефективності; програмно-інструментальне забезпечення та дослідження технічних параметрів автопоїздів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для дослідження і аналізу щодо підвищення ефективності функціонування одноланкових автопоїздів у міжнародному сполученні у цій статті використано теорію енергоресурсної ефективності автомобіля розробленої Хабутдіновим Р. А. [5] і статистичний метод аналітичної ієрархії Т. Сааті [13].

Враховані ключові технічні параметри нових одноланкових автопоїздів на основі модульного підходу за схемою **структурно-параметричної організації конструкції АТЗ** [5]. Згідно теорії Хабутдінова Р. А. [5] процес переміщення автомобіля чи автопоїзда з вантажем забезпечується роботою чотирьох основних пристроїв конструкції: енергоперетворюючого, вантажонесучого, гальмівного і кермового. Оцінювання ефективності функціонування автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень здійснено на основі використання кількісних значень ключових параметрів одноланкових автопоїздів, які характеризують важливі властивості їхніх компонент, та підрахунку інтегрального індексу за теорією аналітичної ієрархії Т. Сааті [13]. Згідно з нашим підходом автопоїзд, для якого інтегральний індекс, обчислений на основі застосування теорії аналітичної ієрархії Т. Сааті, рівний найбільшому значенню серед індексів порівнюваних автопоїздів, вважається найкращим за критеріями енергоефективності та транспортної ефективності.

Енергетична ефективність автопоїзда

Енергетична ефективність автопоїзда для міжнародних вантажних автомобільних перевезень – це показник, який відображає здатність автопоїзда ефективно використовувати енергетичні ресурси (паливо для двигуна, мастильні матеріали у трансмісії, електроенергію від акумуляторних батарей для функціонування приладів, фар

тощо) з урахуванням втрат механічної енергії у трансмісії гальмівній і керівній та гідравлічній системах для виконання транспортних завдань з мінімальними витратами.

Ключовими чинниками, які впливають на енергетичну ефективність автопоїзда є: тип двигуна, його маса і максимальний крутний момент, момент інерції обертових елементів трансмісії, передавальне число трансмісії, загальний коефіцієнт передачі крутного моменту.

Експертно-функціональна модель інтегрального показника ефективності дизельного двигуна E автопоїзда для міжнародних вантажних автомобільних перевезень представлена у вигляді [14]:

$$E = w_1 \cdot \frac{T}{m} + w_2 \cdot \frac{\eta \cdot \omega}{I} - w_3 \cdot \alpha + w_4 \cdot \eta_{tr} - w_5 \cdot L_{tr}, \quad (1)$$

де: η_{tr} – безрозмірний коефіцієнт корисної дії трансмісії; L_{tr} – сумарні відносні втрати потужності в трансмісії; $\frac{T}{m}$ – тягові можливості двигуна на одиницю маси, що впливає на динамічні характеристики автопоїзда; $\frac{\eta \cdot \omega}{I}$ – ефективність використання обертальної енергії двигуна та швидкість досягнення максимальної потужності; α – негативний вплив інерційності двигуна на стабільність роботи і його зношення; η_{tr} – ефективність передачі потужності від двигуна до коліс, що безпосередньо впливає на загальну енергоефективність автопоїзда; L_{tr} – втрати в трансмісії, які знижують корисну потужність і динамічні характеристики; w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – вагові коефіцієнти підраховані методом аналітичної ієрархії Т. Сааті [14].

Транспортна ефективність автопоїзда

Транспортна ефективність автопоїзда в міжнародних вантажних перевезеннях є комплексним показником, який відображає здатність автопоїзда ефективно виконувати міжнародні перевезення з мінімальними витратами ресурсів та максимальною продуктивністю, яка включає технічні та організаційні аспекти.

Нижче наведена **таблиця з позначеннями ключових показників транспортної ефективності механізмів одноланкового автопоїзда** (тягач + причіп) за функціонально-конструктивними модулями вантажонесучого, гальмівного та рульового пристроїв. Вказано напрямок монотонної зміни показника (зростання або спадання), що призводить до підвищення ефективності одноланкового автопоїзда, табл. 1.

Таблиця 1

Позначення	Показники	Напрямок зміни для підвищення ефективності	Коментар
P_v	Вантажність (макс. маса вантажу)	Зростання	Збільшує корисну транспортну роботу
$m_к$	Маса порожнього кузова	Спадання	Зменшує власну вагу автопоїзда
J_p	Жорсткість рами	Зростання	Підвищує міцність і довговічність
f	Коефіцієнт опору коченню	Спадання	Знижує енергетичні втрати
R_t	Ресурс шин	Зростання	Зменшує експлуатаційні витрати

Ця таблиця відображає ключові показники, що впливають на транспортну ефективність автопоїзда, з урахуванням напрямку їх зміни.

Енергетична та транспортна технічна ефективність

Інтегральний показник енергетичної та транспортної ефективності визначаємо за формулою:

$$E = w_1 \cdot \left(w_{11} \frac{T}{m} + w_{12} \frac{\eta \cdot \omega}{I} - w_{13}\alpha + w_{14}\eta_{tr} - w_{15} L_{tr} \right) + w_2 \cdot (w_{21} P_v - w_{22} m_к + w_{23} J_p - w_{24} f + w_{25} R_t), \quad (2)$$

де, T – крутний момент двигуна (Н · м); m – маса двигуна (кг); I – момент інерції двигуна (кг · м^2); ω – кутова швидкість двигуна (рад/с); α – кутове прискорення двигуна (рад/с^2); η – коефіцієнт корисної дії двигуна (безрозмірний); η_{tr} – коефіцієнт корисної дії трансмісії (безрозмірний); L_{tr} – сумарні втрати потужності в трансмісії (Вт або безрозмірна величина, що відображає відносні втрати), P_v – вантажопідйомність (макс. маса вантажу); $m_к$ – маса порожнього кузова; J_p – жорсткість рами; f – коефіцієнт опору коченню; R_t – ресурс шини (англ.: tyre).

Параметри двигуна і трансмісії (позначені ваговим коефіцієнтом w_1):

T/m (тягові можливості); $((\eta \cdot \omega)/I)$ (ефективність обертальної енергії колінчастого валу двигуна); α (інерційність); η_{tr} (ККД трансмісії); L_{tr} (втрати в трансмісії).

Параметри транспортної ефективності (позначені ваговим коефіцієнтом w_2):

P_v (вантажність); $m_к$ (маса порожнього кузова); J_p (жорсткість рами); f (коефіцієнт опору коченню); R_t (ресурс шин).

Кожен параметр нормалізований до безрозмірного вигляду.

Напрямок впливу враховано знаком коефіцієнта (наприклад, $m_к$ має негативний вплив).

Сумарна вага критеріїв відповідає їх важливості в ієрархії.

Вагові коефіцієнти у рівнянні (1) визначаємо аналогічно [14] із застосуванням методу аналітичної ієрархії (MAI) Т. Сааті, [13], який має три етапи:

1. Виконуємо структуризацію систем ієрархічної структури з двома рівнями.
2. На другому етапі виконуються попарні порівняння елементів кожного рівня.
3. Обчислюємо вагові коефіцієнти для елементів кожного рівня. При цьому виконується перевірка якості даних на узгодженість за допомогою визначення індексу узгодженості та відношення узгодженості матриці попарних порівнянь [14]. Індекс узгодженості (*CI*) [13]:

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1), \tag{3}$$

Відношення узгодженості (*CR*):

$$CR = CI/IO, \tag{4}$$

де $IO = 1{,}12$ при розмірності матриці порівнянь $n = 5$. Матриця попарних порівнянь (2) вважається добре узгодженою, якщо відношення узгодженості $CR \le 0{,}1$ при $n \ge 5$.

Після визначення вагових коефіцієнтів та перевірки їх за допомогою індексу узгодженості та відношення узгодженості, одержуємо остаточно формулу обчислення інтегрального індексу енергетичної та транспортної ефективності дизельного автопоїзда:

$$E = 0.6 \cdot \left(0.4\frac{T}{m} + 0.2\frac{\eta \cdot \omega}{I} - 0.1\alpha + 0.2\eta_{tr} - 0.1L_{tr} \right) + 0.4 \cdot (0.3P_v - 0.25m_к + 0.2J_р - 0.15f + 0.1R_t). \tag{5}$$

Приклад.

Застосувати інтегральний показник енергетичної та транспортної ефективності *E*, який поданий формулою (5), до систем одноланкових автопоїздів **Volvo FM**, **Freightliner Cascadia** (причепи відповідно стандартні) та визначити, яка модель одноланкового автопоїзда ефективніша за цим показником.

Інтегральний показник ефективності *E* для автопоїздів Volvo FM та Freightliner Cascadia розраховано за формулою (5) та використання нормалізованих параметрів.

Результати обчислень

Таблиця 2

Енергетична ефективність автопоїздів Volvo FM і Freightliner Cascadia

Параметри	Volvo FM	Volvo FM нормалізовані	Freightliner Cascadia	Freightliner Cascadia нормалізовані
Крутний момент двигуна, *T*	1750 Н·м	1750/2000 = 0.875	1750 Н · м	1750/2000 = 0.875
Маса двигуна, *m*	1200 кг	1 – 1200/2000 = 0.4	1100 кг	1 – 1100/2000 = 0.45
Момент інерції колінвала двигуна, *I*	18 кг·м²	0.82	16 кг·м²	0.73
Кутова швидкість колінвала двигуна, ω	95 рад/с	$\frac{95}{120} = 0{,}79$	105 рад/с	105/120 = 0.875
ККД двигуна, η	0.40	0.40	0.42	0.42
ККД трансмісії η_{tr}	0.85	0.85	0.88	0.88
Втрати у трансмісії L_{tr}	0.15	0.15	0.12	0.12

Таблиця 3

Транспортна ефективність

Параметр	Volvo FM	Volvo FM нормалізовані	Freightliner Cascadia	Freightliner Cascadia нормалізовані
Вантажність автопоїздів P_v	20 000 кг	20 000/25 000 = 0.8	21000 кг	21 000/25 000 = 0.84
$m_к$	7500 кг	1 – 7500/8000 = 0.0625	7200 кг	1 – 7200/8000 = 0.1
$J_р$	0.78	0.78	0.82	0.82
f	0.012	0.012	0.010	0.010
R_t	0.85	0.85	0.88	0.88

Інтегральний показник ефективності для автопоїздів Volvo FM та Freightliner

1. Розрахунок для Volvo FM.

Обчислення:

$$E_{Volvo} = 0.6 \cdot (0.4 \cdot 0.875 + 0.2 \cdot 0.385 - 0.1 \cdot 0.1 + 0.2 \cdot 0.85 - 0.1 \cdot 0.15) +$$

$$+ 0.4 \cdot (0.3 \cdot 0.8 - 0.25 \cdot 0.0625 + 0.2 \cdot 0.78 - 0.15 \cdot 0.012 + 0.1 \cdot 0.85) = 0.5286..$$

2. Розрахунок для Freightliner Cascadia

Обчислення:

$$E_{Fr} = 0.6 \cdot (0.4 \cdot 0.875 + 0.2 \cdot 0.503 - 0.1 \cdot 0.1 + 0.2 \cdot 0.88 - 0.1 \cdot 0.12) +$$

$$+ 0.4 \cdot (0.3 \cdot 0.84 - 0.25 \cdot 0.1 + 0.2 \cdot 0.82 - 0.15 \cdot 0.010 + 0.1 \cdot 0.88) = 0.5538.$$

Результати обчислень інтегрального показника порівнянь між автопоїздами Volvo FM і Freightliner Cascadia представлені у табл. 4.

Таблиця 4

Порівняння інтегральних показників автопоїздів Volvo FM і Freightliner Cascadia

Автопоїзд	Інтегральний показник (*E*)
Volvo FM	0.5286
Freightliner Cascadia	0.5538

Freightliner Cascadia має вищий інтегральний показник ефективності (0.5538 проти 0.5286 у Volvo FM). Це обумовлено:

1. Кращими енергетичними параметрами:
- Вищий ККД трансмісії ($\eta_{tr} = 0.88$ проти 0.85).
- Менші втрати в трансмісії ($L_{tr} = 0.12$ проти 0.15).
- Вища ефективність обертальної енергії ($\eta \cdot \omega / I \approx 0.503$ проти 0.385).

2. Кращими транспортними параметрами:
- Вища вантажопідйомність ($P_v = 0.84$ проти 0.8).
- Менший коефіцієнт опору коченню ($f = 0.010$ проти 0.012).
- Вищий ресурс шин ($R_t = 0.88$ проти 0.85).

Отже, за критерієм інтегрального показника ефективності (5) Freightliner Cascadia є більш ефективним автопоїздом порівняно з Volvo FM.

Висновки

Вирішено задачу розроблення експертно-функціональної моделі обчислення інтегрального показника енергетичної та транспортної ефективності сучасних дизельних одноланкових автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень. Розроблено та верифіковано математичну модель інтегрального показника енергетичної та транспортної ефективності дизельного одноланкового автопоїзда з пневматичною підвіскою і запропоновано комплексну методику визначення енергетичної та транспортної ефективності одноланкових автопоїздів для виконання міжнародних вантажних перевезень.

Список використаної літератури

1. Динамічні властивості і стабільність функціонування автотранспортних засобів / Д. В. Абрамов, Н. М. Подригало, М. А. Подригало, О. С. Полянський, В. Л. Файст [за ред. Подригало М. А., Полянський О. С.]. Х. : ХНАДУ, 2014. 204 с.

2. Тарасов Ю. В. Наукові основи забезпечення технічного рівня автотранспортних засобів при проектуванні та модернізації : автореф. дис. на здобуття наук. ступення докт. техн. наук: спец. 05.22.02 – автомобілі та трактори / Ю. В. Тарасов. Харків, 2021. 40 с. 119.

3. Потапов М. М. Підвищення ефективності функціонування елементів шасі повнопривідних колісних засобів транспорту : автореф. дис. на здобуття наук. ступення канд. техн. наук : спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» / М. М. Потапов. Харків, 2021. 20 с.

4. Омельченко В. І. Поліпшення енергоефективності транспортних засобів шляхом підвищення коефіцієнта корисної дії колісного рушія. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт». Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2024 р.

5. Хабутдінов Р. А. Системна концепція енергоресурсної синергії та методологія технологічно-інноваційного управління на автотранспорті / Р. А. Хабутдінов // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науковотехнічний збірник. К.: НТУ, 2020. Вип. 1 (46). DOI: 10.33744/2308-6645-2020-1-46-365-374.170

6. В. П. Сахно, С. В. Цимбал, В. М. Поляков, І. С. Мурований, С. М.. Шарай, і М. П. Рой, «Теоретичні засади використання триланкових автопоїздів для виконанні перевезень вантажів», *BMT*, вип. 18, вип. 2, с. 155–167, Лют 2024.

7. Прокудін Г. С. Проблеми організації, управління та підвищення ефективності перевезень: стан, проблеми, перспективи розвитку: монографія за ред. Г. С. Прокудіна, Л. М. Савчук. Дніпро: Пороги, 2021. 300 с.

8. Свірін Д. О. Підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень вантажів у логістичних ланцюгах – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.01 «Транспортні системи» (275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)) Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021. 160 с.

9. Поляков А. П., Гречанюк М. С.. Аналіз шляхів підвищення стійкості та керованості вантажних автомобілів з напівпричепами. Поляков А. П. Аналіз шляхів підвищення стійкості та керованості вантажних автомобілів з напівпричепами [Текст] / А. П. Поляков, М. С. Гречанюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2010. № 5. С. 90–95.

10. Бегерський Д. Б., Коваль А О. Вплив геометричних параметрів автопоїзда на його аеродинамічні характеристики. Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: тези XV міжнародної науково-практичної конференції, 24–26 жовтня 2022 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2022. С. 23–24.

11. Вікович І. А. Теорія руху транспортних засобів. Підручник з грифом Мін. освіти і науки молоді та спорту України. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. 672 с.

12. Гащук П. Автомобіль: Теорія колісного рушія.-Київ Видавничий дім «Кондор», 2018. 328 с. 191 + 5 іл., 3 табл., Бібліогр.: 39 назв.

13. Сааті Т. Л. Аналітичний ієрархічний процес: планування, визначення пріоритетів, розподіл ресурсів. Нью-Йорк : McGraw-Hill International Book Co., 1980. 287 с.

14. Приходько В. Е. Оцінювання енергоефективності сучасних автопоїздів для міжнародних вантажних перевезень/Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. Луцьк: ЛНТУ, 2025. № 1(24). С. 355–366.

References

1. Abramov D. V., Podryhalo N. M., Podryhalo M. A., Polyansky O. S., Feist V. L. (eds. Podryhalo M. A., Polyansky O. S.) *Dynamic Properties and Stability of Operation of Automotive Transport Vehicles*. Kharkiv : KhNADU, 2014. 204 p.

2. Tarasov Yu. V. *Scientific Foundations for Ensuring the Technical Level of Road Transport Vehicles during Design and Modernization*: Author's Abstract of Doctoral Dissertation in Technical Sciences (05.22.02 – Automobiles and Tractors). Kharkiv, 2021. 40 p.

3. Potapov M. M. *Increasing the Efficiency of the Chassis Elements of AllWheelDrive Wheeled Transport Vehicles*: Author's Abstract of Candidate of Technical Sciences Dissertation (05.22.20 – Operation and Repair of Transport Means). Kharkiv, 2021. 20 p.

4. Omelchenko V. I. *Improving the Energy Efficiency of Vehicles by Increasing the Efficiency Coefficient of the Wheel Drive*. Qualification Manuscript for the Degree of Doctor of Philosophy in Specialty 274 "Automobile Transport". Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2024.

5. Khabutdinov R. A. *A System Concept of EnergyResource Synergy and the Methodology of TechnologicalInnovative Management in Road Transport*. *Visnyk of the National Transport University. Series "Technical Sciences"*. ScientificTechnical Collection. Kyiv: NTU, 2020, Issue 1(46). DOI: 10.33744/23086645202014636537 4

6. Sakhno V. P., Tsymbal S. V., Polyakov V. M., Murovany I. S., Sharai S. M., Roy M. P. "Theoretical Principles for the Use of ThreeLink Road Trains for Freight Transportation". *VMT*, Issue 18 (2), pp. 155–167, Feb. 2024.

7. Prokudin H.S. *Issues of Organization, Management and Improving the Efficiency of Transport: Current State, Challenges, and Development Prospects*. Monograph edited by H. S. Prokudin and L. M. Savchuk. Dnipro : Porohy, 2021. 300 p.

8. Svirin D. O. *Improving the Efficiency of International Road Freight Transport in Logistics Chains*. Qualification Manuscript for the Degree of Candidate of Technical Sciences in Transportation Systems (05.22.01). National Transport University, Kyiv, 2021. 160 p.

9. Polyakov A. P., Grechanyuk M. S. "Analysis of Methods for Improving the Stability and Controllability of Freight Trucks with SemiTrailers". *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, No. 5, pp. 90–95, 2010.

10. Beherskyi D. B., Koval A. O. "The Influence of Geometric Parameters of a Road Train on Its Aerodynamic Characteristics". *Modern Technologies and Prospects for the Development of Road Transport*: Proceedings of the XV International ScientificPractical Conference, October 24–26, 2022. Zhytomyr: Zhytomyr Polytechnic, 2022, pp. 23–24.

11. Vikovych I. A. *Theory of Vehicle Motion*. Textbook approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine. Lviv : Lviv Polytechnic Publishing, 2013. 672 p.

12. Hashchuk P. *Automobile: Wheel Drive Theory*. Kyiv : Kondor Publishing House, 2018. 328 p., 191 + 5 ill., 3 tables, Bibliography 39 titles.

13. Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York : McGrawHill International Book Co., 1980. 287 p.

14. Prykhodko V. E. "Assessment of the Energy Efficiency of Modern Road Trains for International Freight Transport". *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport. Scientific Journal*. Lutsk : LNTU, 2025, No 1(24), pp. 355–366.

УДК 656.13 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.26

В. О. ПРОЦЕНКО
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-3468-4952

ПЕРСПЕКТИВИ УДОСКОНАЛЕННЯ ПАСАЖИРСЬКОГО СПОЛУЧЕННЯ В МІСТІ ХЕРСОНІ ЗАСТОСУВАННЯМ ТРОЛЕЙБУСІВ З АВТОНОМНИМ ХОДОМ

Робота містить аналіз показників якості пасажирського сполучення в м. Херсоні. Показано, що основний обсяг перевезень виконується автобусами малого та середнього класу, на тролейбусні перевезення випадає лише четверта частина загального обсягу. Відмічено, що наявність значної кількості сумісних ділянок в маршрутній мережі пасажирського транспорту м. Херсон призвело до недобросовісної конкуренції на маршрутах, що, зокрема, стало причиною занепаду тролейбусних перевезень. Показано, що з використанням існуючої тролейбусної мережі можливо підвищити якість обслуговування пасажирів шляхом удосконалення існуючих та створення нових маршрутів за рахунок застосування тролейбусів з автономним ходом. Робота містить пропозиції щодо удосконалення існуючих маршрутів а також схеми 13 нових міських маршрутів для тролейбусів з автономним ходом, що сполучають основні райони м. Херсона між собою, з основними установами охорони здоров'я, навчальними закладами. Для розроблених схем визначено довжини руху під контактною мережею та автономним ходом, що дало можливість виконувати техніко-економічні розрахунки. Виконані розрахунки потрібної ємності тягових акумуляторних батарей, що треба враховувати при плануванні інвестицій та енергоспоживання.

Показано, що на першому етапі впровадження тролейбусів з автономним ходом на маршрути м. Херсона, доцільно виконати закупівлю кількох нових машин і виконати дослідження енергоспоживання та особливостей роботи їх систем, зокрема опалення та кондиціонування. Паралельно перспективним є виконання ремонту та модернізації тролейбусів, що були в рооті, з оснащенням їх системою автономного ходу, що можна виконувати на базі тролейбусного депо із залученням студентів навчальних закладів Херсона, вирішуючи питання їх практики.

Ключові слова: *транспортна система, маршрут, тролейбус з автономним ходом, акумулятор, Херсон.*

V. O. PROTSENKO
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Transport Systems and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-3468-4952

PROSPECTS FOR IMPROVING PASSENGER COMMUNICATION IN THE CITY OF KHERSON BY USING AUTONOMOUS TROLLEYBUSES

The article deals with an analysis of the quality indicators of passenger transport in the city of Kherson. It is shown that the main volume of transportation is carried out by small and medium-class buses, trolleybus transportation accounts for only a quarter of the total volume. It is noted that the presence of a significant number of common sections in the route network of passenger transport in the city of Kherson has led to unfair competition on routes, which, in particular, has become the cause of the decline of trolleybus transportation. It is shown that using the existing trolleybus network it is possible to improve the quality of passenger service by improving existing and creating new routes through the use of autonomous trolleybuses. The work contains proposals for improving existing routes, as well as schemes for 13 new city routes for autonomous trolleybuses that connect the main districts of the city of Kherson with each other, with major health care and educational institutions. For the developed schemes, the lengths of movement under the contact network and autonomous movement were determined, which made it possible to perform technical and economic calculations. Calculations of the required capacity of traction batteries were made, which should be taken into account when planning investments and energy consumption.

It is shown that at the first stage of implementation autonomous trolleybuses on the routes of the city of Kherson, it is advisable to purchase several new vehicles and conduct a study of energy consumption and the features of their systems, in particular heating and air conditioning. In parallel, it is promising to carry out repairs and modernization of trolleybuses with equipping them with an autonomous movement system, which can be carried out on the basis of a trolleybus depot with the involvement of students from educational institutions of Kherson.

Key words: *transport system, route, autonomous trolleybus, battery, Kherson.*

Постановка проблеми

Місто Херсон після відновлення сполучення між берегами Дніпра має стати логістичним хабом, центром розміщення та підготовки персоналу для ліквідації наслідків війни, відновлення інфраструктури та господарства лівобережжя. Ці обставини змушують задуматись про способи відновлення та забезпечення відповідності загалом застарілої та нераціональної системи пасажирського сполучення Херсона та області сучасним викликам разом із підвищенням якості перевезення пасажирів. Цим питанням присвячена деяка кількість робіт, де, однак, не міститься конкретних рішень, що становить проблему і стало мотивом для виконання даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Актуальність широкого застосування для пасажирських перевезень у м. Херсоні електротранспорту, підвищенню їх якості з точки зору зменшення навантаження на екосистему міста, зручності використання пасажирами, в тому числі особливих категорій, охарактеризована в багатьох роботах [1, 2]. Величина експлуатаційних витрат та екологічний вплив засобів транспорту є одними з ключових показників якості перевезень і формування тарифу, а відтак ці чинники впливають на вибір пасажирами того чи іншого способу пересування [3, 4].

2023 року прийнято Закон України «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів» [5], згідно з яким передбачається у містах із населенням понад 250 тис. осіб з 2030 року заборонити закупку автобусів з ДВЗ і до 2033 року довести загальну кількість електробусів на маршрутах понад 50 %, а до 2036 року – до 100 %.

В той же час, за даними відкритих джерел [6, 7], основний обсяг пасажирських перевезень в м. Херсоні в основному виконується автобусами малого та середнього класу, а на тролейбусні перевезення на передвоєнний час припадало лише близько 20…25 % пасажиробігу.

Розрахунок основних показників якості перевезення пасажирів для маршрутної мережі Херсона згідно [8, 9] дав можливість встановити, що величина маршрутного коефіцієнту $K_м = \sum L_м / L_{мер} = 4{,}68$ ($\sum L_м$ – сумарна довжина маршрутів у місті, $L_{мер}$ –довжина маршрутної мережі (використано дані к.т.н., доцента П. В. Луб'яного)), демонструє, що більшість маршрутів міського транспорту мають багато сумісних ділянок. Наявність таких ділянок свідчить про те, що маршрути різних видів транспорту прокладені тими самими вулицями, що призвело до виникнення такого негативного явища як недобросовісна конкуренція на маршрутах, значної кількості аварійних ситуацій, що загалом ускладнило роботу тролейбусів. Все це призвело до занепаду тролейбусних перевезень.

Щільність маршрутної мережі для м. Херсона дорівнює $\delta = L_{мер}/F_м = 2{,}33$ км/км^2 ($F_м$ – площа забудованої частини міста), що демонструє резерв для підвищення (максимальне нормальне значення до 4,5 км/км^2). Цього можна досягнути за рахунок виведення маршрутів, які обслуговуються автобусами та маршрутними таксі, за межі магістральних вулиць центра міста, де прокладено тролейбусну мережу, та за рахунок цього інтенсифікації тролейбусних перевезень.

Транспортна рухливість населення у м. Херсоні є достатньо низькою $B_{нас} = Q_{річ}/N_{меш} = 133$ поїздки/рік ($Q_{річ}$ – річний обсяг перевезень, $N_{меш}$ – чисельність населення міста), що пояснюється тенденціями до старіння населення міста через відсутність великих стабільно працюючих підприємств, низьким рівнем розвитку доступного і зручного електротранспорту.

Середня відстань поїздки пасажира становить $L_{ср} = P_{заг}/Q_{річ} = 10{,}6$ км ($P_{заг}$ – загальний пасажирообіг), що є показником вище середнього (5…7 км) та опосередковано підтверджує високу концентрацію маршрутів центральними магістральними вулицями міста, що потребує виконання пасажирами пересадок під час однієї поїздки.

Тролейбусна мережа м. Херсона, що розбудовувалась з 1960 року, найбільшого розквіту зазнала в середині 1980-х років, коли налічувалось 15 маршрутів (рис. 1, табл. 1), з яких на лютий 2022 року працювало 7 (рис. 2, табл. 2), які фактично залишились у спадок від СРСР, пов'язуючи житлові масиви із тогочасними крупними підприємствами, не відповідаючи напрямкам найбільших пасажиропотоків у XXI столітті. Однак, існуюча мережа може дати можливість відновити непрацюючі маршрути чи створювати нові згідно вимог поточного моменту.

Херсон залізничними та автомобільними магістралями з точки зору пасажирського сполучення можна умовно поділити на 7 характерних районів (рис. 2), які відрізняються забудовою, розміщенням центрів тяжіння пасажирів та ін.

В тролейбусному сполученні цих районів наявні наступні основні проблеми:

– із залізничним вокзалом пряме тролейбусне сполучення має тільки центр міста та район «ХБК»;

– район «Острів» не пов'язаний з іншими районами тролейбусними маршрутами (крім «ХБК» та «Житлоселище»);

– відсутнє тролейбусне сполучення між густонаселеними районами «Шуменський» та «Таврійський»;

– тролейбусне сполучення районів «Таврійський» та «ХБК» проходить через усе місто, що робить тролейбус непривабливим засобом для пасажирів, яким треба швидко потрапити з одного із цих районів в інший;

– відсутній електрорух важливими магістральними вулицями (через відсутність контактної мережі) – Грушевського, Івана Богуна, Українською, Університетською, Театральною, просп. Національної гвардії України та ін., що суттєво перевантажує рух ними автобусами малої місткості, призводить до виникнення ДТП;

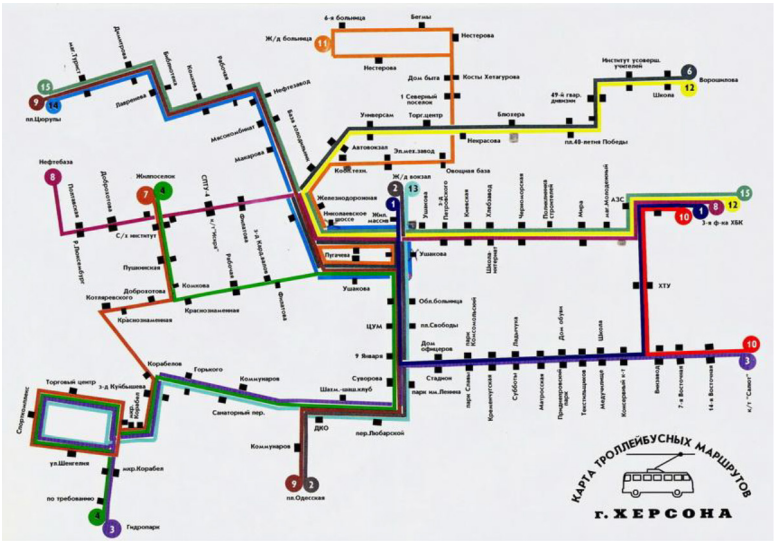


Рис. 1. Схема тролейбусних маршрутів м. Херсона (на 1996 рік) [10]

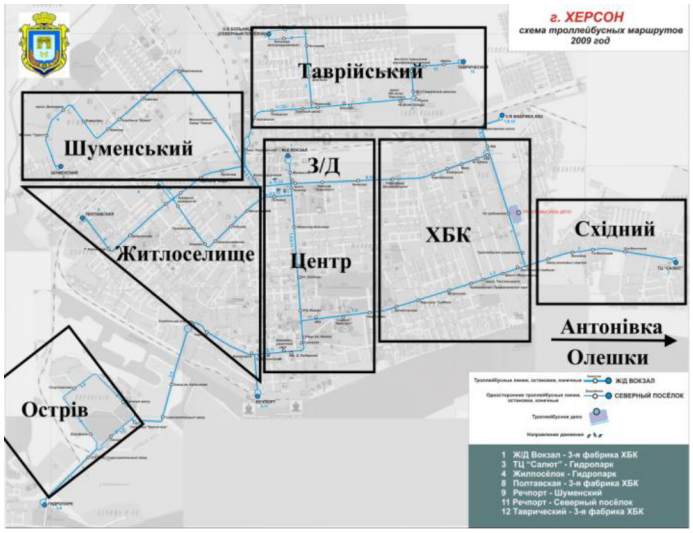


Рис. 2. Схема тролейбусних маршрутів м. Херсона (на 2009-лютий 2022 року) [11] та основних районів, які ними сполучені

– маршрути тролейбусів та автобусів прокладені тими самими вулицями, що призвело до виникнення такого негативного явища як недобросовісна конкуренція через дублювання маршрутів (табл. 2) та виникнення значної кількості аварійних ситуацій;

– не забезпечено сполучення всіх районів з провідними закладами освіти та установами охорони здоров′я;

– відсутнє тролейбусне сполучення з містом-сателітом Херсона Олешками, райцентром Білозерка, селищами Зеленівка, Інженерне і т.ін.

Серед основних проблем забезпечення рухомим складом слід відзначити наступні:

– основний обсяг перевезень у межах міста та приміських районів забезпечується автобусами з ДВЗ середньої місткості типу Богдан/Еталон, мікроавтобусами типу Газель;

– рухомого складу електротранспорту недостатньо (за останні 40 років кількість тролейбусів зменшилася втричі);

– парк тролейбусів застарілий, переважають високопідлогові машини (ЮМЗ, Шкода, ЗиУ).

Формулювання мети дослідження

Наведені проблеми потребують вирішення питання комплексної модернізації транспортної системи міста Херсона з урахуванням нових вимог, з поступовою відмовою від автобусних і перехід до електробусних пасажирських перевезень, як того вимагає закон [5]. Цього можна комплексно досягти, спираючись на потенціал існуючої тролейбусної інфраструктури, зокрема застосуванням тролейбусів з автономним ходом (АХ). Метою роботи є розроблення на рівні схем маршрутів для тролейбусів з АХ, впровадження яких дозволить підвищити якість

Таблиця 1

Параметри тролейбусних маршрутів м. Херсона (на 1996 рік)

№ м-ту	Кінцеві	Довжина маршруту, км	Тривалість рейсу, хв	Експлуатаційна швидкість, км/год	Примітка
1	ТРЦ «Фабрика» – з/д вокзал	18,6	71	15,72	
2	Пл. Одеська – з/д вокзал	8,5	38	13,42	Не працює
3	Гідропарк – пл. Чорновола	28,9	97	17,88	
4	Гідропарк – вул. Комкова	23,8	87	16,41	
5	Пл. Одеська – пл. Чорновола	18,0	62	17,42	Не працює
6	Вул. Покришева – Миколаївське шосе	13,1	50	15,72	Не працює
7	Гідропарк – вул. Комкова	12,4	53	14,04	Не працює
8	ТРЦ «Фабрика» – вул. Полтавська	19,0	68	16,76	
9	Пл. Білозерська – пл. Одеська	19,3	76	15,24	
10	ТРЦ «Фабрика» – пл. Чорновола	9,3	40	13,95	Не працює
11	вул. Гринько – пл. Одеська	18,1	79	13,79	
12	ТРЦ «Фабрика» – вул. Покришева	22,5	80	16,88	
13	Вул. Дорофєєва – з/д вокзал	17,4	65	16,06	Не працює
14	Пл. Білозерська – Миколаївське шосе	14,2	49	17,39	Не працює
15	Пл. Білозерська – ТРЦ «Фабрика» (ч/з вул. І. Кулика)	21,0	80	15,75	Не працює

Таблиця 2

Параметри мережі діючих (на січень 2022 року) тролейбусних маршрутів м. Херсона та їх характеристики

№ м-ту	Кінцеві	Коеф. змінності, $K_з$	Коеф. непрямолінійності, k_i	Ступінь дублювання $\rho_{i,j}$ (вибірково)
1	ТРЦ «Фабрика» – з/д вокзал	1,75	2,91	А30 – 48 % А38, 5 – 29 % А35 – 29 % А8 – 24 %
3	Гідропарк – пл. Чорновола	2,73	1,44	А8, 35 – 56 % А30 – 43 % А5, 17, 38 – 18 %
4	Гідропарк – вул. Комкова	2,25	3,40	А8, 35 – 77 % А34 – 39 %
8	ТРЦ «Фабрика» – вул. Полтавська	1,79	1,40	А17 – 60 % А8, 14 – 40 %
9	Пл. Білозерська – пл. Одеська	1,82	2,35	А5 – 71 % А17 – 67 % А8, 35 – 30 %
11	вул. Гринько – пл. Одеська	1,71	1,46	А8, 35 – 47 % А38 – 53 % А14 – 32 %
12	ТРЦ «Фабрика» – вул. Покришева	2,12	9,38	А14 – 100 % А8, 17 – 33 %
	Середнє значення	2,06	3,19	–

обслуговування пасажирів та виконати вимоги згаданого закону, а також попереднє обґрунтування застосування рухомого складу на цих маршрутах з розробленням основних рекомендацій щодо їх впровадження.

Тому основні задачі даної роботи є такими:

– запропонувати схеми маршрутів для тролейбусів з автономним ходом, впровадження яких дозволило би зменшити вказані проблеми в пасажирському сполученні в м. Херсоні;

– визначити параметри тягових акумуляторних батарей (ТАБ) для тролейбусів з АХ, що працюватимуть на запропонованих маршрутах;

– розглянути варіанти комплектування транспортними засобами розроблених маршрутів та визначити собівартість перевезення пасажирів;

– показати та оцінити резерви зниження собівартості перевезення пасажирів і запропонувати заходи, що дали би змогу цього досягти;

– запропонувати основні заходи що допомогли б реалізувати наведені технічні рішення на практиці.

Викладення основного матеріалу дослідження

Процес розробки раціональної мережі тролейбусних маршрутів (в т.ч. з АХ) повинен переслідувати наступні реально досяжні цілі:

– покращення якості обслуговування населення маршрутами міських тролейбусів;
– усунення необґрунтованого дублювання маршрутів руху міських тролейбусів автобусами;
– зменшення завантаження магістральних вулиць центра міста потоками автобусів на користь тролейбусів;
– забезпечення сполучення мікрорайонів тролейбусами між собою за рахунок використання існуючої тролейбусної мережі та прокладання тролейбусних маршрутів неелектрифікованими магістральними вулицями (напр. вул. Грушевського, Івана Богуна, Українською, Університетською, Театральною, вул., просп. Національної гвардії України та ін.) за рахунок застосування тролейбусів з АХ;
– забезпечення тролейбусного сполучення з населеними пунктами-сателітами м. Херсона, зокрема м. Олешки та с.м.т. Білозерка, Антонівка, Зеленівка, с. Інженерне, Кіндійкою та ін., що дасть можливість інтенсифікувати рух продуктивних сил, та сприятиме розвитку Херсонської міської громади.

Загальна схема існуючих та пропонованих маршрутів показана на рис. 3, а основні параметри нових маршрутів зведені в табл. 3.

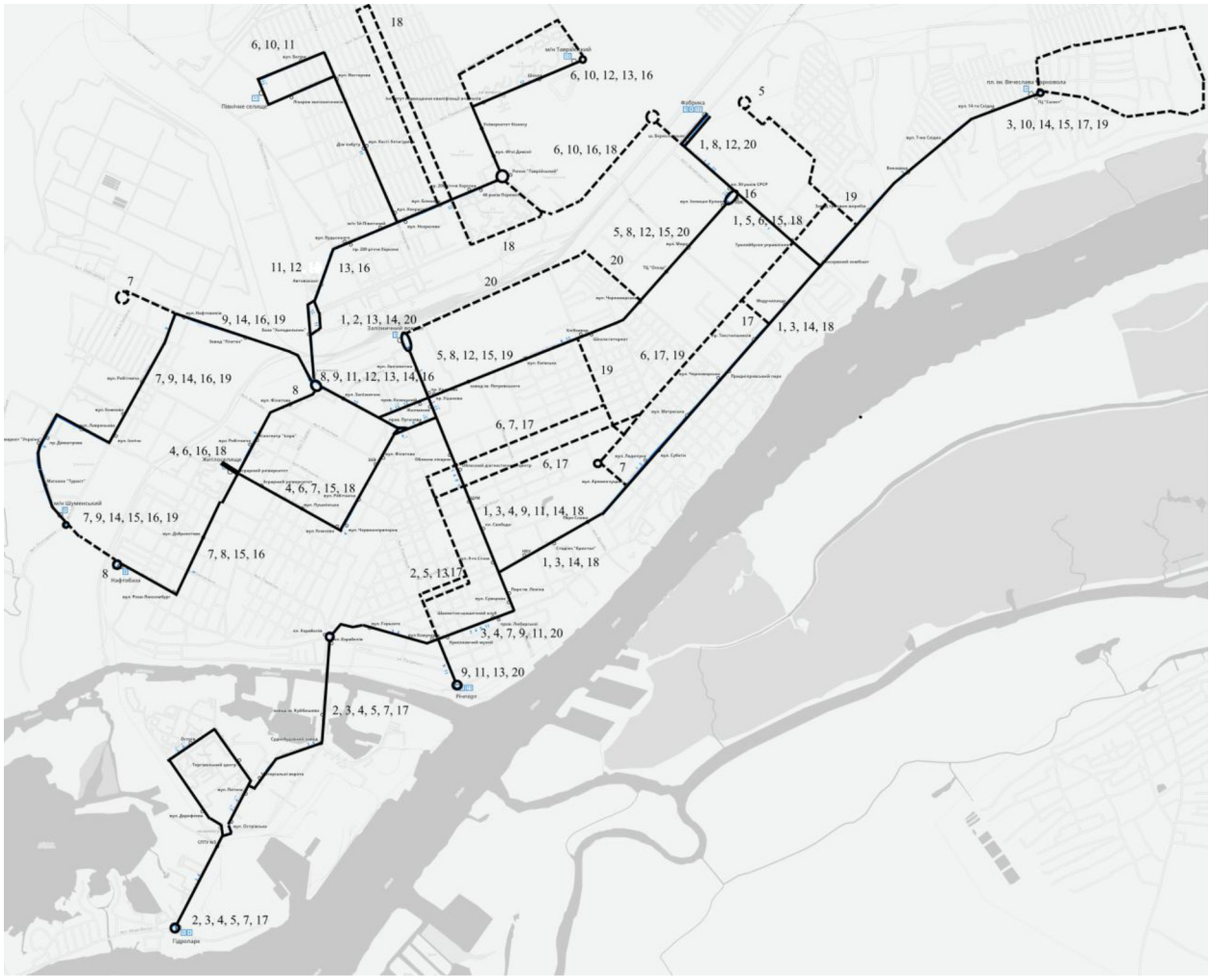


Рис. 3. Схема пропонованих та існуючих тролейбусних маршрутів

Потрібну ємність ТАБ для тролейбусів з АХ на запропонованих маршрутах виконували, використовуючи модель проф. С. І. Андрусенка [12]. У розрахунках брали витрату електроенергії H_0 = 2,3 кВт · год/км., питому ємність ТАБ C_0 = 3,8 кВт · год/км. (обчислено за даними випробувань у м. Харкові, де клімат холодніший), потужність зарядки ТАБ при рухові під контактною мережею $P_{зкм}$ = 30 кВт [13], результати зведено в табл. 4.

Далі виконували розрахунок вартості експлуатації транспортного засобу (грн./км) згідно методики [14] для автобуса (1) та тролейбуса (2).

$$S_{eABT} = P_{ABTпал} + AM_{ABT} + P_{TO} + P_{ABTмем} + P_{ш} + P_{ОПвк} + ЄСВ_{РОП} + ПКР_{ABT}, \quad (1)$$

Таблиця 3

Основні параметри розроблених міських тролейбусних маршрутів з АХ

№ маршруту	Кінцеві зупинки	Довжина маршруту $L_м$, км	Відстань ходу під контактною мережею $L_{км}$, км	Відстань автономного ходу $L_{ах}$, км	Ємність ТАБ $C_{ТАБ}$, кВт · год
2	З/д вокзал – Гідропарк	19,1	13,5	5,6	22
5	ТЕЦ – Гідропарк	27,5	20,5	7,0	44
6	Вул. Гринька – вул. Полтавська	42,0	24,0	18,0	67
7	Вул. Нафтовиків (г/м «Нова лінія») – Гідропарк	40,2	32,2	8,0	44
10	Вул. Гринька – вул. Комсомольська (Кіндійка)	34,0	20,1	13,9	67
13	Вул. 49 Гв. Дивізії – пл. Одеська	26,0	17,5	8,5	44
14	Пл. Білозерська – з/д вокзал – м. Олешки	52,8	32,8	20,0	67
15	Пл. Чорновола – пл. Дубинди – с.м.т. Білозерка	45,3	24,6	20,7	67
16	Вул. Комкова – пл. Дубинди	36,8	26,0	10,8	44
17	Пл. Чорновола – Гідропарк	30,0	16,5	13,5	67
18	Вул. Комкова – вул. Космічна	34,0	22,0	12,0	44
19	Пл. Білозерська – вул. Комсомольська (Кіндійка)	37,8	23,2	12,6	67
20	ТРЦ «Фабрика» – пл. Одеська	18,4	13,0	5,4	22

де $P_{АВТпал}$ – питомі витрати на паливо для автобуса, грн./км; $АМ_{АВТ}$ – питомі витрати на амортизацію автобуса, грн./км; $P_{ТО}$ – питомі витрати на ТО та ПР автобуса (сюди входить заробітна плата ремонтних робітників з єдиним соціальним внеском (ЄСВ), грн./км; $P_{АВТмем}$ – питомі витрати на мастило та інші експлуатаційні матеріали, грн./км; P_{in} – витрати на зношування та ремонт шин, грн./км; $P_{ОПвк}$ – питомі витрати на оплату праці водіїв та кондукторів, грн./км; $ЄСВ_{РОП}$ – єдиний соціальний внесок (22 % від фонду оплати праці), грн./км; $ПКР_{АВТ}$ – інші прямі витрати, грн./км.

$$S_{еТРОЛ} = P_{ТРОЛен} + АМ_{ТРОЛ} + P_{ТО} + P_{ш} + P_{ТРОЛкмтп} + P_{ОПвк} + ЄСВ_{РОП} + ПКР_{ТРОЛ}, \quad (2)$$

де $P_{ТРОЛен}$ – питомі витрати на електроенергію, грн./км; $АМ_{ТРОЛ}$ – питомі витрати на амортизацію тролейбуса, грн./км; $P_{ТРОЛкмт}$ – питомі витрати утримання контактно-кабельної мережі та тягових підстанцій, грн./км.; $ПКР_{ТРОЛ}$ – інші прямі витрати, грн./км.

Постійні величини складових експлуатаційних витрат та норм приймали наступними: норма експлуатаційного пробігу шини $H_ш$ = 70 тис. км.; величина середньомісячної оплати праці ремонтного робітника $ЗП_р$ = 18 750 грн.; величини середньомісячної оплати праці водія та кондуктора, відповідно $ЗП_в$ = 25 000 грн., $ЗП_к$ = 12 500 грн.; ціна дизельного палива $Ц_{пал}$ = 53 грн./л; ціна електроенергії $Ц_{ен}$ = 4,32 грн./(кВт×год); ціна утримання контактно-кабельної мережі та тягових підстанцій $Ц_{кмтп}$ = 6 грн./км., пасажиропотік 4000 пас./добу. Комплектування маршрутів транспортними засобами розглядали згідно наступних варіантів.

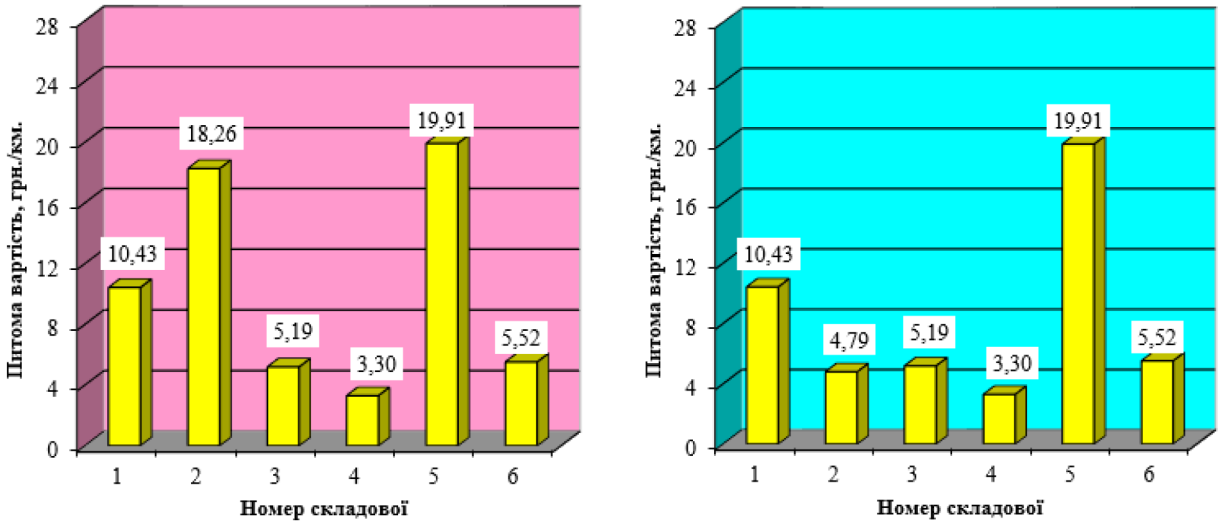
Варіант 1. Автобус ЕТАЛОН А08128 (новий): вартість $B_{ТЗ}$ = 4,0 млн. грн.; термін використання транспортного засобу $T_{вик}$ = 7 років; пасажиромісткість $ПМ_{ТЗ}$ = 68 пасажирів; витрата палива $B_{пал}$ = 25 л/100 км; величина нормативу трудомісткості ТО $T_{ТО}$ = 15 год/1000 км. пробігу; величина нормативу трудомісткості ПР $T_{ПР}$ = 10 год/1000 км. пробігу; кількість шин, встановлених на один ТЗ $n_ш$ = 6 шт.; вартість однієї шини $B_ш$ = 10 000 грн.; середня експлуатаційна швидкість $V_е$ = 19 км/год.

Варіант 2. Тролейбус з АХ PTS-12309 (новий): вартість $B_{ТЗ}$ = 16,0 млн. грн.; пасажиромісткість $ПМ_{ТЗ}$ = = 77 пасажирів; термін використання транспортного засобу $T_{вик}$ = 10 років; величина нормативу трудомісткості ТО $T_{ТО}$ = 25 год/1000 км. пробігу; величина нормативу трудомісткості ПР $T_{ПР}$ = 8 год/1000 км. пробігу; кількість шин, встановлених на один ТЗ $n_ш$ = 6 шт.; вартість однієї шини $B_ш$ = 12 000 грн.; середня експлуатаційна швидкість $V_е$ = 15 км/год.

Варіант 3. Тролейбус ЛАЗ Е183D1, що був у вжитку (вартість $B_{ТЗ}$ = 1,0 млн. грн.) та виконання його капітального ремонту з оснащенням системою АХ (вартість робіт $B_{КРМ}$ = 3,2 млн. грн.). Вважаємо при цьому, що пасажиромісткість зменшиться до $ПМ_{ТЗ}$ = 77 пасажирів за рахунок маси ТАБ та системи управління тягою. З огляду на викладене, всі складові собівартості, крім амортизації, залишаться без змін, тому обчислюємо лише її і перераховуємо собівартість за даними попереднього прикладу.

Варіант 4. Прокладання контактно-кабельної мережі ціною $Ц_{КМ}$ = 40 млн. грн./км. на відстань $0{,}5L_{ах}$ = 6,75 км (вул. Університетська) для кількох маршрутів – № 6, 7, 17, 19 терміном використання $T_{вик}$ = 30 років та експлуатація на них тролейбусів типу Богдан Т70117 (пасажиромісткістю $ПМ_{ТЗ}$ = 105 пасажирів), що вже проамортизовані.

Діаграми розподілу складових питомих витрат на 1 км пробігу для розробленого маршруту № 17 у випадку закупки нових тролейбусів з АХ PTS-12309 показана на рис. 4, *а*. Основні витрати припадають на амортизацію ТЗ, оплату праці водія та кондуктора, та витрати на електроенергію. Розрахунок показує, що собівартість перевезення пасажира при відмові від роботи кондукторів зменшиться на 13 % – до 22,90 грн. Аналогічна картина має місце для випадку закупки б/в тролейбусів ЛАЗ Е183D1 з їх капітальним ремонтом та встановленням системи АХ (рис. 4, *б*). Тут собівартість перевезення пасажира при відмові від роботи кондукторів зменшиться на 17 % – до 17,24 грн.



а б

Рис. 4. Діаграма складових питомої вартості перевезення для тролейбуса з АХ PTS-12309 (а) та ЛАЗ Е183D1 (б): 1 – витрати на електроенергію; 2 – витрати на амортизацію; 3 – витрати на ТО і ПР; 4 – витрати на утримання контактно-кабельної мережі; 5 – витрати на оплату праці водія та кондуктора; 6 – ЄСВ

Результати розрахунків собівартості перевезення пасажира для всіх маршрутів представлено на рис. 5–7. На прикладі маршруту № 17 можемо показати, що зрівнятися за собівартістю перевезення пасажира з дизельним автобусом (варіант 1, $S_{епас}$ = 19,55 грн.) може капітально відремонтований на базі депо тролейбус (варіант 3, $S_{епас}$ = 20,64 грн.) чи прокладання контактно-кабельної мережі (варіант 4, $S_{епас}$ = 19,02 грн.) за умови прокладення нею кількох маршрутів і амортизації протягом 30 років.

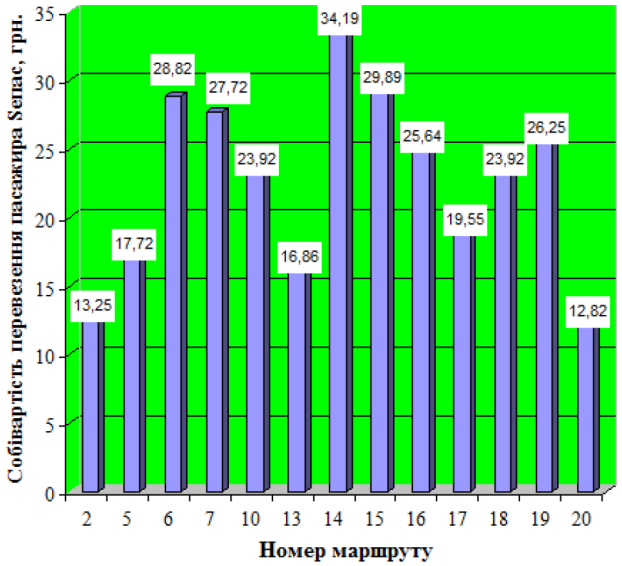


Рис. 5. Діаграма собівартостей перевезення одного пасажира на розроблених маршрутах із застосуванням нових автобусів ЕТАЛОН А08128

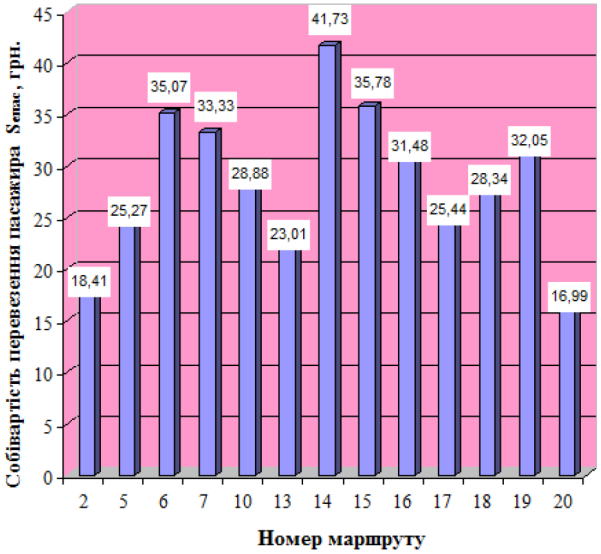


Рис. 6. Діаграма собівартостей перевезення одного пасажира на розроблених маршрутах із застосуванням нових тролейбусів PTS-12309

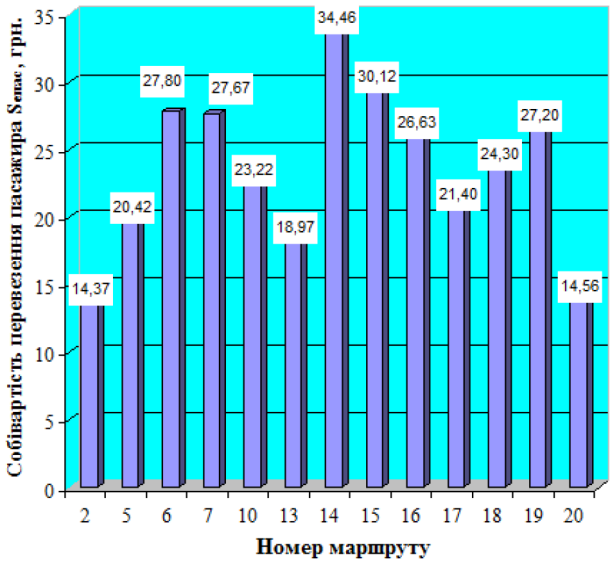


Рис. 7. Діаграма собівартостей перевезення одного пасажира на розроблених маршрутах із застосуванням ЛАЗ Е183D1 після КР та встановлення системи АХ

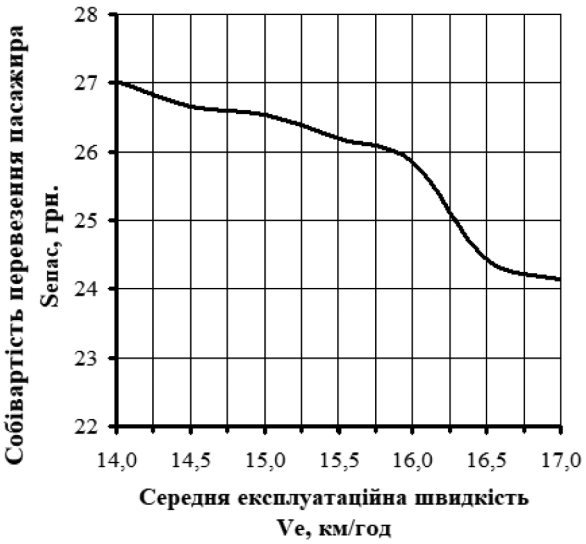


Рис. 8. Графік впливу середньої експлуатаційної швидкості на собівартість перевезення пасажира тролейбусом PTS-12309 на пропонованому маршруті 17

Варіант із закупівлею нових тролейбусів PTS-12309 ($S_{епас}$ = 26,30 грн.) є найдорожчим, проте цілком реальним за умов кредитування чи участі в грантових програмах. Співставляючи потрібну кількість тролейбусів (≈ 80 машин), яка потрібна для забезпечення роботи на всіх маршрутах з кількістю списаних машин (в Києві понад 35 тільки машин ЛАЗ Е183D1), можна передбачати закупівлю тролейбусів, що були в експлуатації, в тому числі за кордоном, а також замовлення нових машин типу PTS-12309.

За рахунок аналізу тролейбусних маршрутів м. Херсона (табл. 1) за стандартом [15] встановлено [16], що середнє значення експлуатаційної швидкості V_e тролейбусів по м. Херсону з імовірністю 95 % коливається в межах від 14,97 км/год до 16,55 км/год що демонструє можливість її підвищення на практиці. Розрахунками встановлено (рис. 8), що при збільшенні середньої експлуатаційної швидкості на модельному маршруті № 17 на 13 % з (15 км/год до 17 км/год) дає можливість знизити собівартість перевезення пасажирів тролейбусом з АХ (варіант 2) на 9 % (з 26,54 грн. до 24,14 грн.) за рахунок зменшення кількості машин на маршруті, що при обсягу перевезень $КП_{доб}$ = 4000 пасажирів дає добову економію близько 10 тис. грн. і формує умови для розроблення організаційних заходів забезпечення перевезень та управління рухом тролейбусів на маршрутах, зокрема інтелектуального управління світлофорною сигналізацією [17].

Висновки

У статті запропоновано заходи для удосконалення пасажирського сполучення у м. Херсоні за рахунок застосування тролейбусів з автономним ходом. При цьому можна зробити наступні висновки.

1. За рахунок аналізу основних параметрів маршрутної системи м. Херсона, зокрема довжини маршрутної мережі, пасажирообігу, річного обсягу перевезень, показано, що основний обсяг перевезень виконується автобусами малого та середнього класу, на тролейбусні перевезення випадає лише 20…25 % обсягу. Наявність значної кількості сумісних ділянок в маршрутній мережі пасажирського транспорту м. Херсон призвело до виникнення такого негативного явища як недобросовісна конкуренція на маршрутах, що, зокрема, призвело до занепаду тролейбусних перевезень (за 30 років тролейбусний парк скоротився більше ніж втроє).
2. Херсонська агломерація включає в себе населені пункти-супутники загальною чисельністю населення понад 60 тис. осіб. Сполучення деяких із цих населених пунктів може бути організовано тролейбусами з АХ із забезпеченням їх руху по міських маршрутах.
3. Парк тролейбусів м. Херсона застарілий, переважають високопідлогові машини (75 %), те саме стосується автобусів. Існуючі сім маршрутів тролейбуса (на 2022 рік) в м. Херсоні мають високий ступінь дублювання автобусними (автобусні маршрути № 8 та № 35 на 30…50 % дублюють більшість тролейбусних), є також автобусні маршрути, що дублюють тролейбусні на 100 %). Загалом, тролейбусна система міста застаріла, оскільки існуючі маршрути не відповідають напрямкам найбільших пасажиропотоків – відсутнє пряме сполучення більшості районів із залізничним вокзалом, найбільшими лікарнями та університетами, а також густонаселених районів між собою, відсутній електрорух рядом магістральних вулиць.

4. Транспортна система м. Херсона потребує удосконалення з урахуванням вимог законодавства щодо забезпечення екологічності, що можна реалізувати зокрема застосуванням тролейбусів з АХ і ширшим використанням наявної тролейбусної мережі за рахунок створення нових маршрутів та розширення існуючих. Це потребуватиме виконання нового обстеження транспортних потоків та уточнених розрахунків.

5. Заходи щодо удосконалення існуючих тролейбусних маршрутів застосуванням тролейбусів з автономним ходом можуть бути наступними: маршрути № 1, 8, 12 можуть бути продовжені до селищ Зеленівка, Молодіжне, Інженерне. Маршрут № 3 – до с. Антонівка. Маршрут № 11 – до с. Степанівка та Чорнобаївка.

6. Розроблено схеми 13 нових маршрутів для тролейбусів з автономним ходом, що сполучають основні райони м. Херсона між собою, з основними установами охорони здоров'я, навчальними закладами. Для розроблених схем визначено довжини руху під контактною мережею та автономним ходом. Виконані розрахунки потрібної ємності ТАБ дали можливість встановити, що для комплектації тролейбусів, що працюватимуть на розроблених маршрутах потрібна закупівля трьох типорозмірів ТАБ: на 22, 44 та 67 кВт · год, що треба враховувати при плануванні інвестицій та енергоспоживання.

7. Виконано розрахунок собівартості перевезення пасажира на всіх маршрутах для трьох варіантів комплектування транспортними засобами – новими автобусами ЕТАЛОН А08128, новими тролейбусами PTS-12309 та капітально відремонтованими силами тролейбусного депо тролейбусами ЛАЗ Е183D1 зі встановленням системи АХ та прокладання контактної мережі. На прикладі одного з маршрутів показано, що зрівнятися за собівартістю перевезення пасажира з дизельним автобусом (варіант 1, $S_{епас}$ = 19,55 грн.) може капітально відремонтований на базі депо тролейбус (варіант 3, $S_{епас}$ = 20,64 грн.) чи прокладання контактно-кабельної мережі (варіант 4, $S_{епас}$ = 19,02 грн.). Варіант із закупівлею нових тролейбусів PTS-12309 забезпечує найвищу собівартість перевезення пасажира ($S_{епас}$ = 26,30 грн.). Оновлення тролейбусного парку потребуватиме кредитування чи участі в грантових програмах.

8. На основі виконаних розрахунків запропоновано організаційні та технічні напрямки зниження собівартості перевезення пасажирів: встановлення системи дистанційного контролю та оплати проїзду (резерв зниження собівартості 13…17 %). Показано, що при збільшенні середньої експлуатаційної швидкості на модельному маршруті № 17 на 13 % з (15 км/год до 17 км/год) дає можливість знизити собівартість перевезення пасажирів тролейбусом з АХ на 9 % (з 26,54 грн. до 24,14 грн.), що при обсягу перевезень $КП_{доб}$ = 4000 пасажирів дає добову економію близько 10 тис. грн. і формує умови для розроблення організаційних заходів забезпечення перевезень та управління рухом тролейбусів на маршрутах. Такі заходи, насамперед повинні стосуватись ремонту дорожного полотна для забезпечення підвищення швидкості, обмеження паркування на вул. Грушевського, Театральній, Українській, і т.д., запровадження інтелектуального управління світлофорною сигналізацією та ін.

9. На першому етапі впровадження тролейбусів з АХ на маршрути м. Херсона доцільно виконати закупівлю кількох нових машин і виконати дослідження енергоспоживання та особливостей роботи їх систем, зокрема опалення та кондиціонування з метою уточненого нормування витрат електроенергії та розрахунків витрат. Паралельно доцільною є закупівля експлуатованих машин типу ЛАЗ чи Богдан, виконання їх ремонту та модернізації на базі тролейбусного депо з оснащенням системою АХ, до чого доцільно залучати студентів навчальних закладів, організувавши таким чином їх практику та цим досягнувши синергетичного ефекту.

10. Запропоновані в роботі рішення та заходи є лише схемними, але і вони можуть стати основою для більш широкої дискусії та подальших досліджень, не відміняючи головного – для змін у ширшому запровадженні електротранспорту у пасажирські перевезення м. Херсона з покращенням їх якості потрібна воля і ряд подекуди радикальних та непопулярних рішень місцевої адміністрації, мотивування якої може забезпечити свідома громадянська спільнота херсонців.

Напрямки подальших досліджень:

– розроблення алгоритму розрахунку раціональних параметрів ТАБ для маршрутів тролейбусів з АХ з урахуванням їх довговічності;

– техніко-економічна оцінка способів забезпечення роботи тролейбусів з АХ, включаючи прокладання контактно-кабельної мережі та заряджання від генераторів;

– дослідження впливу алгоритмів регулювання дорожнього руху на експлуатаційну швидкість тролейбусів на маршрутах м. Херсона.

Список використаної літератури

1. Малєєв В. О., Безпальченко В. М. Електротранспорт м. Херсона: екологічність, економічність, ергономічність / *Екологічні науки: науково-практичний журнал*, 2021. № 7(34). С. 61-66. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.114

2. Малєєв В. О., Безпальченко В. М. Технічні новації та еколого-економічні переваги міського електротранспорту м. Херсона / *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 2021, № 1(76). С. 56–65. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.1.7

3. Войтович О. А., Кузьменко І. О., Луб'яний П.В. Доступність пасажирського транспорту для населення з огляду формування тарифу / *Науковий вісник Херсонської державної морської академії.* 2023. № 1–2(26–27). С. 107–120. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.107-118

4. Войтович О. А., Луб'яний П. В., Мосьпан В. М., Кузьменко І. О. Модель розрахунку вибору способу пересування за критерієм доступності / *Науковий вісник Херсонської державної морської академії.* 2024. № 2(29). С. 178–186. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.178-186

5. Закон України «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів» № 3220-IX від 30.06.2023.

6. Головне управління статистики у Херсонській області. URL: https://www.ks.ukrstat.gov.ua/

7. Херсонська торгово-промислова палата. URL: https://www.tpp.ks.ua/golovna.html

8. Луб'яний П. В., Войтович О. А. Організація пасажирських перевезень: навчальний посібник. Херсон : ХНТУ, 2019. 186 с.

9. Босняк М. Г. Пасажирські автомобільні перевезення. К. : Слово, 2009. 272 с.

10. Херсон – Схеми та розклади руху. URL: https://transphoto.org/photo/272606/

11. Херсон – Схеми та розклади руху. URL: https://transphoto.org/photo/193103/

12. Андрусенко С. І., Будниченко В. Б., Подпіснов В. С. Математична модель енергетичної ємності тягової акумуляторної батареї / *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник*. 2021. № 3(50). С. 3–10. https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-3-50-003-010

13. Будниченко І. В., Харламов С. А. Методика оцінки споживання енергії електробусом та параметрів тягової акумуляторної батареї в умовах експлуатації / *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 1(22). С. 97–105. https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1350

14. Андрусенко С. І., Будниченко В. Б., Подпіснов В. С. Розробка методики визначення експлуатаційних витрат автобусів та тролейбусів з різними видами силових установок / *Науково-виробничий журнал «Автошляховик України» (Автомобільний транспорт)*. 2022. № 2(270). С. 15–25. https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-2-270-15-25

15. Подавання результатів випробування статистичне. Оцінювання середнього значення. Довірчий інтервал (ISO 2602:1980, IDT): ДСТУ ISO 2602:2006. [Чинний від 2007-10-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. 7 с. (Національний стандарт України).

16. Будниченко В. Б., Проценко В. О., Бабій М. В. Напрямки підвищення екологічності транспортної системи міста Херсона. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 16–18 квітня 2024 року: збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. Вінниця: ВНТУ, 2024. С. 69–72.

17. Славич В. П., Савченко М. О. Модель чотирифазної системи управління транспортним потоком / *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2024. № 1(28). С. 196–204. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.196-204

References

1. Malieiev V. O., Bezpalchenko V. M. (2021) Elektrotransport m. Khersona: ekolohichnist, ekonomichnist, erhonomichnist [Electric transport in Kherson: environmental friendliness, economy, ergonomics]. Ekolohichni nauky: naukovo-praktychnyi zhurnal, 7(34), 61–66. [In Ukrainian]. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.114

2. Malieiev V. O., Bezpalchenko V. M. (2021) Tekhnichni novatsii ta ekoloho-ekonomichni perevahy miskoho elektrotransportu m. Khersona [Technical innovations and environmental and economic advantages of urban electric transport in Kherson]. Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, 1(76), 56–65. [In Ukrainian]. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.1.7

3. Voitovych O. A., Kuzmenko I. O., Lubianyi P. V. (2023) Dostupnist pasazhyrskoho transportu dlia naselennia z ohliadu formuvannia taryfu [Accessibility of passenger transport for the population in terms of tariff formation]. 1–2(26–27), 107–120. [In Ukrainian]. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.107-118

4. Voitovych O. A., Lubianyi P. V., Mospan V. M., Kuzmenko I. O. (2024) Model rozrakhunku vyboru sposobu peresuvannia za kryteriiem dostupnosti [Model for calculating the choice of transportation mode based on accessibility criteria]. Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii, 2(29), 178–186. [In Ukrainian]. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.178-186

5. Zakon Ukrainy «Pro deiaki pytannia vykorystannia transportnykh zasobiv, osnashchenykh elektrychnymy dvyhunamy, ta vnesennia zmin do deiakykh zakoniv Ukrainy shchodo podolannia palyvnoi zalezhnosti i rozvytku elektrozariadnoi infrastruktury ta elektrychnykh transportnykh zasobiv» № 3220-IX vid 30.06.2023. [In Ukrainian].

6. Holovne upravlinnia statystyky u Khersonskii oblasti. https://www.ks.ukrstat.gov.ua/

7. Khersonska torhovo-promyslova palata. https://www.tpp.ks.ua/golovna.html
8. Lubianyi P. V., Voitovych O. A. (2019) Orhanizatsiia pasazhyrskykh perevezen: navchalnyi posibnyk [Organization of passenger transportation: a training manual]. Kherson, 186 p. [In Ukrainian].
9. Bosniak M. G. (2009) Pasazhyrski avtomobilni perevezennia [Passenger road transportation]. Kyiv, 272 p. [In Ukrainian].
10. Kherson – Skhemy ta rozklady rukhu. https://transphoto.org/photo/272606/
11. Kherson – Skhemy ta rozklady rukhu. https://transphoto.org/photo/193103/
12. Andrusenko S. I., Budnychenko V. B., Podpisnov V. S. (2021) Matematychna model enerhetychnoi yemnosti tiahovoi akumuliatornoi batarei [Mathematical model of the energy capacity of a traction battery]. Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriia "Tekhnichni nauky". Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. № 3(50), 3–10. [In Ukrainian]. https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-3-50-003-010
13. Budnychenko I. V., Kharlamov S. A. (2024) Metodyka otsinky spozhyvannia enerhii elektrobusom ta parametriv tiahovoi akumuliatornoi batarei v umovakh ekspluatatsii Methodology for assessing the energy consumption of an electric bus and the parameters of the traction battery in operating conditions]. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti. № 1(22), 97–105. [In Ukrainian]. https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1350
14. Andrusenko S. I., Budnychenko V. B., Podpisnov V. S. (2022) Rozrobka metodyky vyznachennia ekspluatatsiinykh vytrat avtobusiv ta troleibusiv z riznymy vydamy sylovykh ustanovok [Development of a methodology for determining the operating costs of buses and trolleybuses with different types of power plants]. Naukovo-vyrobnychyi zhurnal "Avtoshliakhovyk Ukrainy" (Avtomobilnyi transport). 2(270), 15–25. [In Ukrainian]. https://doi.org/10.33868/0365-8392-2022-2-270-15-25
15. Podavannia rezultativ vyprobuvannia statystychne. Otsiniuvannia serednoho znachennia. Dovirchyi interval (ISO 2602:1980, IDT): DSTU ISO 2602:2006. – [Chynnyi vid 2007-10-01]. – Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2009. – 7 p. – (Natsionalnyi standart Ukrainy). [In Ukrainian].
16. Budnychenko V. B., Protsenko V. O., Babii M. V. (2024) Napriamky pidvyshchennia ekolohichnosti transportnoi systemy mista Khersona [Directions for improving the environmental friendliness of the Kherson city transport system]. Materialy XII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii "Problemy ta perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu", 16–18 kvitnia 2024 roku: zbirnyk naukovykh prats [Elektronnyi resurs] / Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Vinnytskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet [ta insh.], 69–72. [In Ukrainian].
17. Slavych V. P., M., Savchenko M. O. (2024) Model chotyryfaznoi systemy upravlinnia transportnym potokom [Model of a four-phase traffic flow control system]. Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii, 1(28), 196–204. [In Ukrainian]. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.196-204

UDC 537.84 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.27

O. V. RADIONOV
Doctor of Engineering Science, Professor,
Professor at the Technical Service
and Industrial Machinery Engineering Department
Sumy National Agrarian University,
Chief R&D Engineer Zhejiang Special Motor Co., Ltd
ORCID: 0000-0001-7282-578X

N. V. TARELNYK
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technical System Designs
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6304-6925

S. V. PAVLOVSKYI
Postgraduate Student at the Department of Technical Service
and Industrial Machinery Engineering Department
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0009-0003-1629-9959

MAGNETIC FLUID SEALS FOR BEARING ASSEMBLIES OF MINE MAIN VENTILATION FANS

The conditions of the work of main ventilation fans and their impact on the reliability of the seal bearing fan assemblies are analyzed. The application of magnetic fluid seal complexes instead of regular seals is proved.

Computer simulation of nonlinear magnetic processes in the core of magnetic fluid seal (MFS) numerical finite element method using the software package Comsol by varying the gap in the range of 0.1...1.0 mm was carried out. The technique is described in detail.

The calculation was performed in two stages. In the first stage distribution was calculated in static magnetic field (MF) in the active zone of the seal considering the nonlinear characteristics of magnetic circuit and the magnetic fluid in the magnetic saturation assuming M = Ms. It identifies the position of the MF boundary limited by isobars p = Ms · B = = const, where B = |B| – magnetic induction vector module. In the second stage hydrodynamic processes in MF while the shaft rotates under the assumption that the magnetic fluid boundaries coincide with boundaries of liquid in static conditions were calculated. At the same time we take into account the empirical nonlinear dependence of the viscosity MF on the magnetic field and the nonlinear properties of the Navier-Stokes equations. Thus, the problem in two stages regarded as loosely coupled, which allowed to perform consistent solution.

The developed mathematical model of magnetic and hydrodynamic processes occurring in the seal gap allowed to design and implement optimized design of magnetic fluid sealing complex (MFSC) for two main ventilation fans of various types considering the increasing gaps in the work area of seal.

Analysis of operating experience MFSC proves the prospects of their application in the main ventilation fans (MVF).

The research results are confirmed by experimental-industrial exploitation of MVF with installed with sealing complexes. MFSC tests were carried out on the mine axial fan ВОД-30М (m. Ternovskaya, Pavlograd) and centrifugal mine fan ВЦ-25 (m. Yubileinaya, Pavlograd).

Key words: *magnetic fluid seal, magnetic fluid, the main ventilation fan.*

О. В. РАДІОНОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування
Сумський національний аграрний університет,
головний інженер з НДДКР
Завод спеціальних електродвигунів (м. Шенчжоу, провінція Чжецзян)
ORCID: 0000-0001-7282-578X

Н. В. ТАРЕЛЬНИК
кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри проектування технічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6304-6925

С. В. ПАВЛОВСЬКИЙ
аспірант кафедри технічного сервісу
та галузевого машинобудування
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0009-0003-1629-9959

МАГНІТОРІДИННІ ГЕРМЕТИЗАТОРИ ДЛЯ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ ШАХТНИХ ВЕНТИЛЯТОРІВ ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ

Проаналізовано умови роботи вентиляторів головного провітрювання та їх вплив на надійність ущільнень підшипникових вузлів вентиляторів. Обґрунтовано застосування магніторідинних герметизуючих комплексів замість штатних ущільнень.

Тому було проведено комп'ютерне моделювання взаємопов'язаних нелінійних магнітних та гідродинамічних процесів в активній зоні магніторідинного герметизатора (МРГ) чисельним методом кінцевих елементів за допомогою пакету програм Comsol при варіюванні зазору в діапазоні 0,1…1,0мм.

Розрахунок виконували у два етапи. На першому етапі розрахували розподіл у статичних умовах магнітного поля в активній зоні герметизатора з урахуванням нелінійних характеристик магнітопроводу та у припущенні насичення магнітної рідини (МР) M = Ms. При цьому визначали положення кордону МР, обмежене ізобарами p = = Ms · B = const, де B = |B| – Модуль вектора магнітної індукції. На другому етапі розраховували гідродинамічні процеси в МЖ при обертанні валу в припущенні, що межі магнітної рідини збігаються з межами рідини в статичних умовах. При цьому враховували нелінійну емпіричну залежність в'язкості МР від величини магнітного поля та нелінійні властивості рівняння Нав'є-Стокса. Таким чином, завдання на двох етапах розглядали як слабко пов'язані, що дозволило виконати їхнє послідовне рішення.

Розроблена математична модель магнітних та гідродинамічних процесів, що відбуваються в зазорі герметизатора, дозволила спроектувати та впровадити оптимізовані конструкції магніторідинного герметизуючого комплексу (МРГК) для двох вентиляторів головного провітрювання різних типів з урахуванням підвищених зазорів у робочій зоні.

Аналіз досвіду експлуатації МРГК доводить перспективність їх застосування у вентиляторах головного провітрювання (ВГП).

Результати досліджень підтверджено дослідно-промисловою експлуатацією вентиляторів головного провітрювання із встановленими герметизуючими комплексами. Були проведені випробування МЖГК на осьовому шахтному вентиляторі ВОД-30М (ш. Тернівська, м. Павлоград) та відцентровому шахтному вентиляторі ВЦ-25 (ш. Ювілейна, м. Павлоград).

Ключові слова: *магнітнорідинний герметизатор, магнітна рідина, вентилятор головного провітрювання.*

Formulation of the Problem

Any modern mine has a large high-performance ventilation systems to pump the air out of the mine. Themselves fans can be both centrifugal and axial. As a conventional sealing the bearing assemblies are commonly used seal, consisting of several elements – the centrifugal drop ring mounted on the surface of the shaft, groove seal, formed the central part of the bearing unit lid and placed in the groove cover rubber reinforced lip seal with spring. The protective sleeve is installed on shaft that protects the shaft from abrasion by sealing lip.

At first glance, the lip seal is in optimal conditions (rich lubricating of sealing lips, high, but not outrageous speed, high quality surface of the protective sleeves, roller bearings, etc.) and seal bearing unit will work well for a long time. The main factor that greatly complicates the lip seal and seal on the whole, are the working conditions in the mine [1].

Main ventilation fans, when working on the absorption, moves mine air, different from the atmospheric because of presence in it of various gases, vapors, acids, significant number of small coal, dust and water. The large amount of solids in the pumped air to the bearing assemblies of axial fans is a major factor adversely affecting the work of bearings units. Intensively getting of particles under lip of lip seal wear the shaft surface and reduce seal sealing ability, expressed s an increase in oil leakage and ingress of solid particles in the lubricating oil in the bearings, which can lead to very negative consequences. Moisture and corrosive gases also penetrate into the bearing assembly, contributing to reduced reliability and performance as the bearing assembly and the fan in general.

It is possible to eliminate the negative impact on the mine atmosphere on sealing lips by installing a hermetic seal in front of the lip seal, guaranteed detaining abrasives particles, moisture, and corrosive gases. Really as such seal may only be used magnetic fluid seal, which is really almost airtight seal. By and large, the magnetic fluid seal has only one drawback – when sealing fluids, in MFS is possible the hydrodynamic mixing of sealed medium and magnetic fluid, which will lead to a malfunction of MFS (problems arise at high linear velocities in the gap and/or held high pressure drop) [2, 3].

In this case, when MFS is installed outside of lip seal, these two types of seals reinforce strengths and compensate for each other's shortcomings – the MFS unit protects against ingress of solid particles on the outside, pushing them out of the working gap filled with magnetic fluid cuff, the lip seal, working in plentiful greasing prevents leakage of lubricating oil from the bearing assembly and oil from entering the working gap of MFS.

The best solution is to combine the two sealing elements – the lip seal and the MFS – in one design as a combined seal or MFSC [4].

Research Methodology

The function of the sealing element in MFS performs magnetic fluid, retained in the gap between the shaft and pole pieces of MFS by magnetic field of permanent magnets. The gap is typically of 0.2–0.25 mm mainly due to the technical and technological capabilities provide running clearance for the bearing unit or the mechanism as a whole.

However, working gap for MVF in MFS has to be increased up to 0.4–0.7 mm, and even up to 1 mm. This is due primarily to the significant size of shafts and bearings, for which the own radial gaps will increase; to the operating conditions when wet dust adheres of on the fan impeller blades and causes its imbalance and the appearance of the mechanism vibration; and with a significant aging of MVF (about 80 % of the fans are operated with exceed of the the resource established by enterprises – manufacturers today) and the poor quality of repair work.

With an increase in the working gap will be a sharp weakening of the magnetic field and, as a consequence, the deterioration of the sealing properties of MFS. However, questions of exploitation of MFS with the gaps of more than 0.3 mm are almost not discussed in the literature.

In addition, the diameters of shafts and linear velocities in the gap, typical for MVF, become a tangible negative effect of the centrifugal forces acting on the magnetic fluid in the working gap [5].

Therefore, for a clear understanding of the behavior of the magnetic fluid in the gap of mine fans MFS must take into account the high speed and the effect of centrifugal force, and the possible weakening of the magnetic field, and the uneven flow in the gap caused by the radial runout of the shaft, as well as other factors.

It is particularly important to know the distribution of the magnetic field in the gap of MFS. This question is not studied because of sharply inhomogeneous magnetic field in the gap, complex geometry because of teeth on pole pieces, non-linear characteristics of permanent magnets, pole pieces and magnetic fluid. Even the use of numerical methods for the calculation did not give significant results due to the high complexity of the calculations. Only in recent years, the development of computer technology has allowed to solve such problems. However, work on the distribution of the magnetic field at the gaps in excess of 0.2 mm, to date, does not exist.

The purpose of the work

The aim of this work is computer simulation of nonlinear magnetic processes in the core of MFS numerical finite element method as a basis for recommendations to improve the design of MFS and to generalize the use of MFS for the repair and modernization of MVF in mines.

Results and Discussion

Data on the distribution of the magnetic field in the gap is needed to understand the behavior of MF in the MFS gap, as all the main characteristics of the seal are determined by the parameters of the magnetic field. Therefore, computer simulation of nonlinear magnetic processes in the core of MFS numerical finite element method using the software package Comsol by varying the gap in the range of 0.1...1.0 mm was carried out. The technique is described in detail in [6].

The calculation was performed in two stages. In the first stage distribution was calculated in static magnetic field in the active zone of the seal considering the nonlinear characteristics of magnetic circuit and the magnetic fluid in the magnetic saturation assuming $M = Ms$. It identifies the position of the MF boundary limited by isobars $p = Ms \cdot B = \text{const}$, where $B = |B|$ – magnetic induction vector module. In the second stage hydrodynamic processes in MF while the shaft rotates under the assumption that the magnetic fluid boundaries coincide with boundaries of liquid in static conditions were calculated. At the same time we take into account the empirical nonlinear dependence of the viscosity MF on the magnetic field and the nonlinear properties of the Navier-Stokes equations. Thus, the problem in two stages regarded as loosely coupled (classification [7]), which allowed to perform consistent solution.

The examined MFS (Fig. 1) is characterized by the axial symmetry hence the field problem can be solved in two-dimensional formulation in the cylindrical coordinate system in $r0z$ plane. The computational domain for the magnetic field analysis is shown in Fig. 1b and contains the regions with the magnetic materials of three types: the permanent magnets, the magnets that magnetized in the axial direction, the ferromagnetic material of the magnetic system poles, and the rotational shaft, as well as the region occupied by the ferrofluid.

The calculation results are presented in Fig. 2 and 3. The predicted decrease the induction should be noted (Fig. 4).

It is an interesting fact that when $\delta > 1{,}0$ mm, the highly inhomogeneous field is no longer observed, which reached at the presence of the magnetic flux concentrator. In Fig. 3 clearly shows the absence of the peak areas, which generally indicates a lack of a magnetic field to keep the fluid in the gap.

While solving the hydrodynamic problem of a magnetic fluid flow in the MFS gap the following assumptions were made: the position of free MF borders in dynamics during the rotation of the shaft coincides with the boundary in the static; distribution of the magnetic field in the gap of MFS at the given position of the boundary MF coincides with the calculated field distribution (see. Fig. 2).

Hydrodynamic calculation showed that for typical operating conditions of MVF (speed is less than 1000 rev/min) vortex structures for all values of the gap up to 0.8 mm inclusive, in the magnetic fluid do not arise.

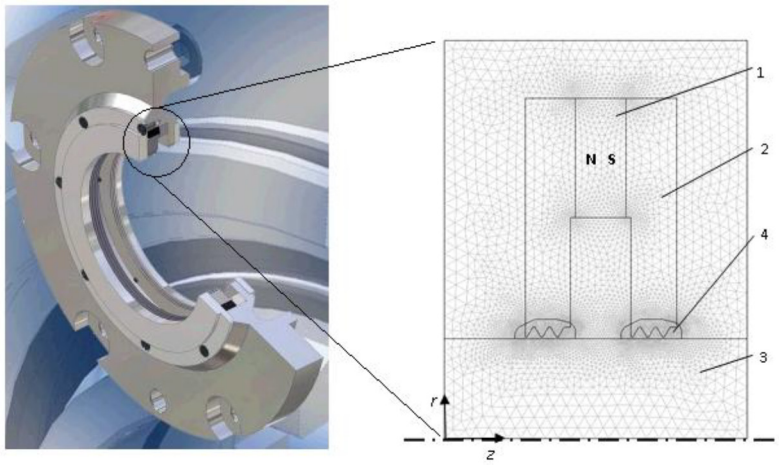
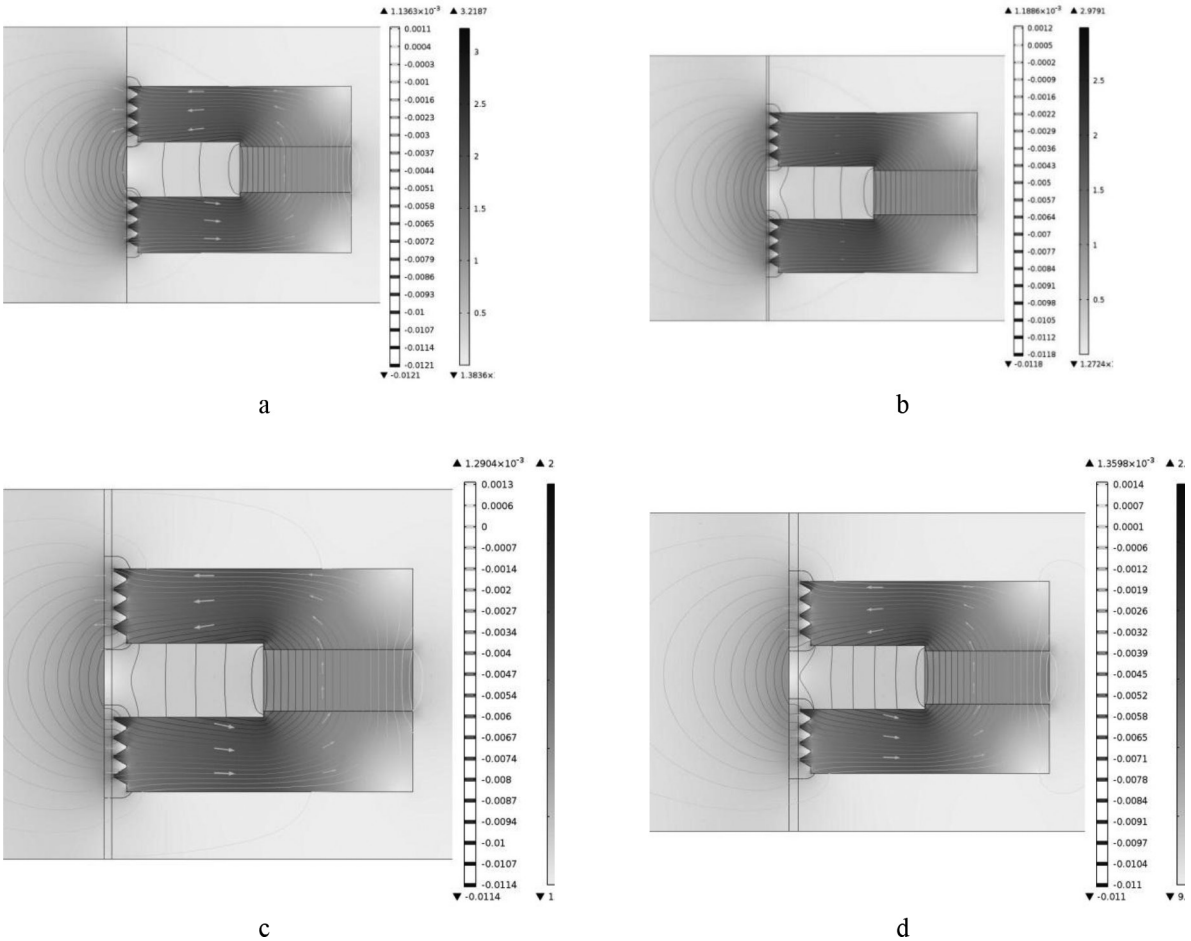


Fig. 1. MFS design scheme
General view of a MFS standard design (*a*) and the core estimation area with the applied finite element mesh (*b*) (1 – permanent magnet, 2 – pole piece, 3 – magnetic fluid 4 – shaft)



a b

c d

Fig. 2. The distribution of the magnetic field lines (isolines $A_\varphi r$), as magnetic induction, mm:
***a* – 0.1; *b* – 0.4; *c* – 0.7; *d* – 1**

Fig. 5 shows the structure of the vortex originating in the magnetic fluid and formed by radial and azimuthal velocity components at a gap of 1.0 mm. The structure with the highest speed of the vortex appears in the rightmost field, which is caused by the presence of large size free liquid boundary. There are also vortex structures in other slot regions; however, the maximum velocity therein is several times less intense due to braking of fluid by surrounding magnetic circuit wall.

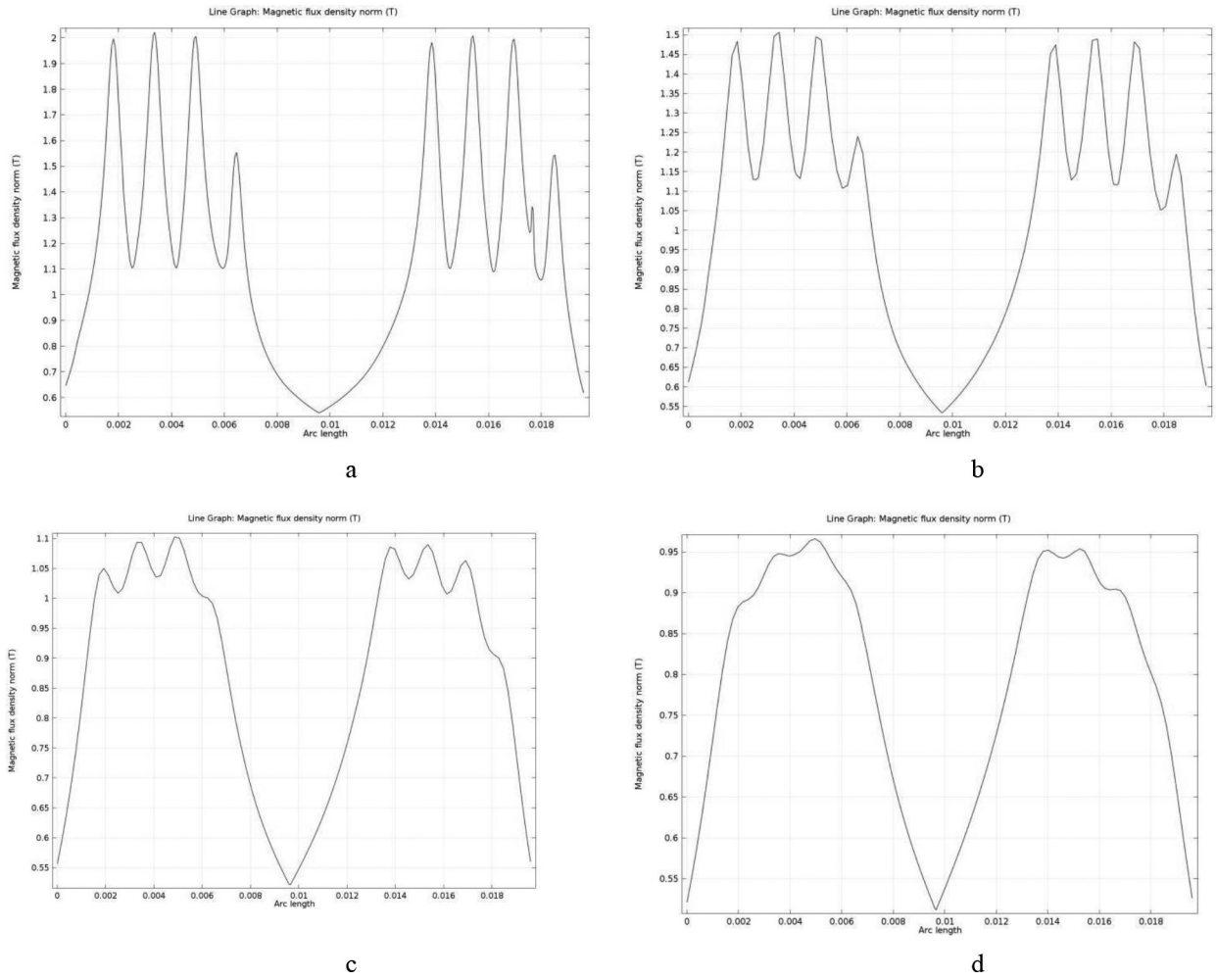


Fig. 3. The distribution of radial component of magnetic induction on the surface of the shaft at the gap, mm: *a* – 0.1 mm; *b* – 0.4; *c* – 0.7; *d* – 1

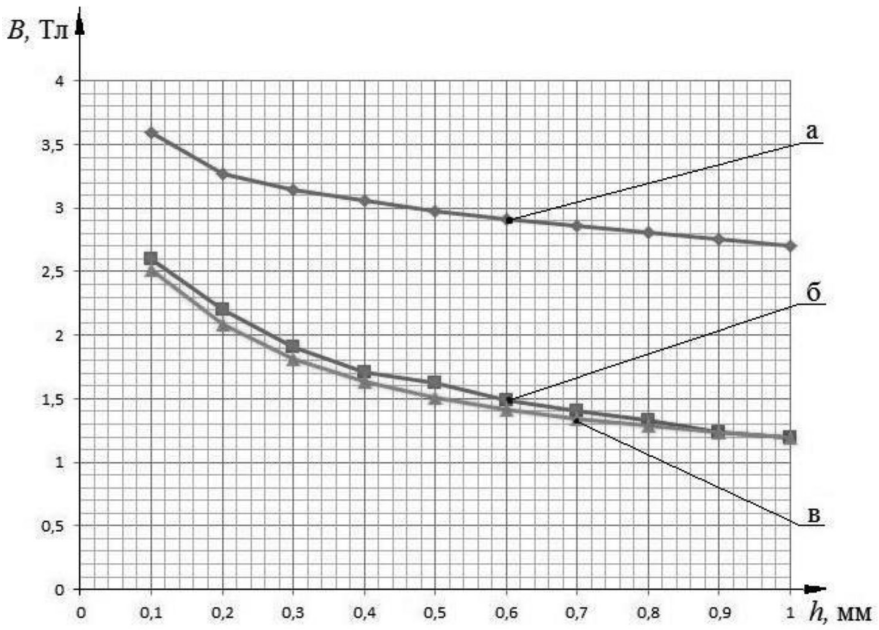


Fig. 4. The distribution of the magnetic field induction of the magnetic flux concentrator to the shaft: *a* – on a magnetic flux concentrator; *b* – in the middle of the gap; *c* – near the shaft surface

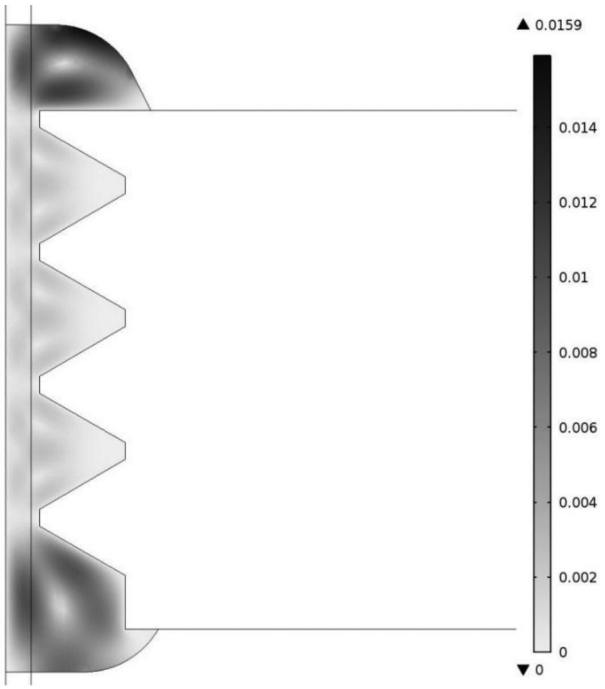


Fig. 5. Vortex structures arising in the magnetic fluid and formed by the radial and azimuthal velocity components

Hydrodynamic calculation results showed that the range of the working gap can be increased to at least up to 0.8 mm.

Tests of MFSC on main ventilation fans

MFSC tests were carried out on the mine axial fan ВОД-30М (m. Ternovskaya, Pavlograd) and centrifugal mine fan ВЦ-25 (m. Yubileinaya, Pavlograd)

Design of MFSC of bearing fan assembly ВЦ-25 is shown in Figure 6 [4].

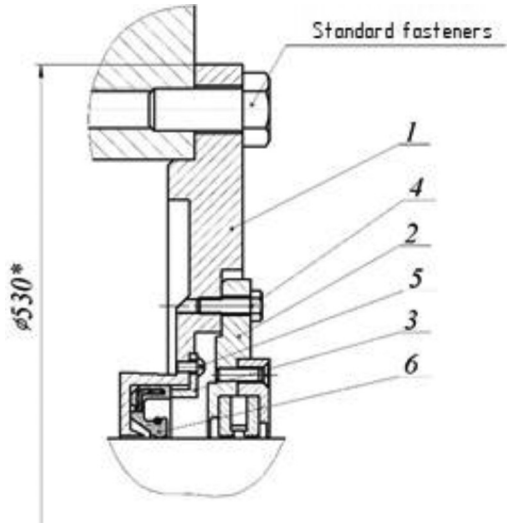


Fig. 6. Magnetic fluid sealing complex of bearing assembly fan ВЦ-25: 1 – intermediate flange; 2 – M10 bolt; 3 – MFS; 4 – bolt M5; 5 – cutting ring 6 – cuff 250 × 290

The complex consists of an intermediate flange 1 and MFS 3. The end face of the intermediate flange has 10 holes M6 for fixing the actual MFS 2 and the annular cavity, which houses the rubber-reinforced cuff 6, which serves as the pre-compression stage.

MFS design is shown in Fig. 7. Magnetic fluid sealer includes a non-magnetic body 1 with a flange, of the magnetic system and nonmagnetic outer cover 2. The magnet system consists of magnets of Nd-Fe-B 6 disposed between two pole pieces 4 and a non-magnetic spacer ring 6. At the surface facing the shaft cut surfaces of the annular pole pieces prongs with grooves between them. The front surface of the cover 4 has a hole for threading the magnetic fluid, choked by bolt M5.

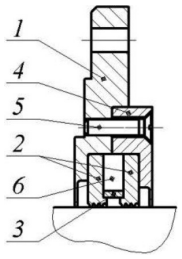


Fig. 7. Magnetic fluid seal fan ВЦ-25: 1 – a non-magnetic body; 2 – a cover; 3 – bolt M6; 4 – pole tip; 5 – magnet Nd-Fe-B; 6 – the spacer ring

Magnetic fluid confined by a magnetic field forms a kind of liquid oil seal that prevents ejection of the oil droplets and vapors from the bearing housing. This oil will be mostly clipped by cuff, and already flying out of its working edge drops and oil mist will be sealed by MFS. Oil stopped by MFS and collected in the cavity between the cuff and MFS, drilling will come back into the cavity of the bearing assembly.

Cuff, which has an outside protection from the penetration of the dust into the working edge, works in almost perfect conditions of abundant lubricant that provides long-term work of assemblywithout the need to replace it.

Construction of MFSC for ВОД-30М fan is shown in Figure 8, 9 [8].

MFSC is made detachable, like the bearing fan assembly cover.

The sealing complex consists of three parts – the big body 1, repeating outer part of the standard cover bearing assembly and MFS mountable with the help of standard bolts 2, mounted on the end of a large body, and the front cover ("boot") 3. In the cavity between them cuff 4 is located – which serves as the pre-compression stage. MFS 2 is fixed on the face of a large body 1 by bolts 5.

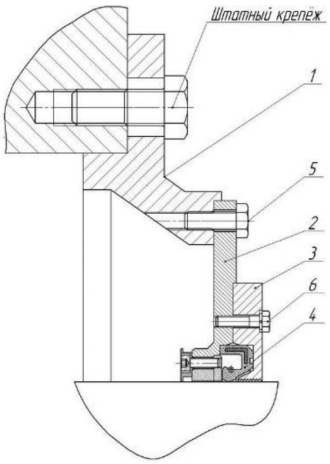


Fig. 8. The seal of the bearing assembly: 1 – the big body, 2 – MFS, 3 – front cover ("boot"), 4 – cuff 300 × 340, 5 – bolt M10, 6 – bolt M6

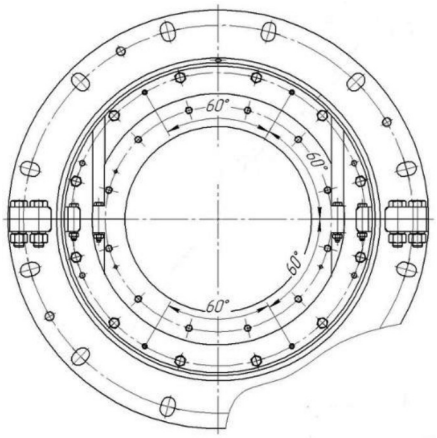


Fig. 9. The seal of the bearing assembly. Front view

Magnetic fluid seal consists of a body with a flange and the magnetic system.

The front cover ("boot") 3 serves as the second pole piece in the MFS, is inserted into the groove on the end face of the flange MFS and clung to it by bolts 6 M6. On the facing surface of the shaft surface of the front cover ("boot") 3 the magnetic flux concentrator are cut – ring prongs with the grooves between them. The outer cylindrical surface of the MFS flange 2 has an opening for filling the magnetic fluid, choked by screw M5.

MFSCs for the centrifugal fan of ВЦ-25 were installed in 2010, and on the axial fan ВОД-30М in 2011. Already at that time the fans had been operated with a significant excess of the resource specified by the manufacturer of this equipment. Maintenance personnel of mines controlled the performance of MFSC every month. Oil emissions were not observed after four years of operation. During 2014–2015 years new main ventilation fans have been installed in the mines.

Conclusions

The developed mathematical model of magnetic and hydrodynamic processes occurring in the seal gap allowed to design and implement optimized design of MFSC for two main ventilation fans of various types considering the increasing gaps in the work area of seal.

Analysis of operating experience MFSC proves the prospects of their application in the MVF.

Bibliography

1. Голінько В. І., Лебедєв Я. Я., Муха О. А. Вентиляція шахт та копалень. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2012. 266 с.

2. Хабазня А. С., Радіонов А. В., Виноградов О. М., Казакуца О. В. Особливості проектування магніторідинних герметизаторів шахтного обладнання // *Вугілля України*. – 2010. – № 12(648), – С. 29–33.

3. Радіонов О. В. Досвід експлуатації магніторідинних герметизаторів у промисловій енергетиці // *Науково-технічний збірник «Гірнича електромеханіка та автоматика»*. – 2011. – № 87, – С. 134–139.

4. Radionov O. Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans // *Magnetohydrodynamics*. – 2018. – № 54(1–2), – P. 109−114.

5. Radionov O., Podoltsev A., Peczkis G. The specific features of high-velocity magnetic fluid sealing complexes // *Open Engineering*. – 2018. – № 8(1), – P. 539–544.

6. Radionov O., Podoltcev A., Zahorulko A. Finite – Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic – Fluid Seal for Rotational Shaft // *Procedia Engineering*. – 2012. – № 39. – P. 327–338.

7. Li D., Li Y., Li Z. Wang Y. Theory analyses and application of magnetic fluids in sealing // *Friction*. – 2023. – № 11(10). – P. 1771–1793.

8. Radionov O. V., Podoltsev A. D., Radionova A. A. Magnetic field in the core of a magnetic fluid seal talking magnetic structural elements into account. 10p Publishing // *Journal of Physics Conference Series*. – 2021. – № 1741. 012037

References

1. Holinko V. I., Lebediev Ya. Ia., Mukha O. A. (2012). Ventyliatsiia shakht ta kopalen [Ventilation of mines and mines]. Dnipropetrovsk: Natsionalnyi hirnychyi universytet, 266 p. [in Ukrainian].

2. Khabaznia A. S., Radionov A. V., Vynohradov O. M., Kazakutsa O. V. (2010). Osoblyvosti proektuvannia mahnitoridynnykh hermetyzatoriv shakhtnoho obladnannia [Design features of magnetofluid sealers of mining equipment] // *Vuhillia Ukrainy*, 12(648), p. 29–33. [in Ukrainian].

3. Radionov O. V. (2011). Dosvid ekspluatatsii mahnitoridynnykh hermetyzatoriv u promyslovii enerhetytsi [Experience in the operation of magnetofluid sealers in the industrial power industry] // *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk "Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka"*, 87, p. 134–139. [in Ukrainian].

4. Radionov O. (2018). Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans // *Magnetohydrodynamics*, 54(1–2), p. 109–114.

5. Radionov O., Podoltsev A., Peczkis G. (2018). The specific features of high-velocity magnetic fluid sealing complexes // *Open Engineering*, 8(1), p. 539–544.

6. Radionov O., Podoltcev A., Zahorulko A. (2012). Finite – Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic – Fluid Seal for Rotational Shaft // *Procedia Engineering*, 39, p. 327–338.

7. Li D., Li Y., Li Z. Wang Y. (2023)/ Theory analyses and application of magnetic fluids in sealing // *Friction*, 11(10), p. 1771–1793.

8. Radionov A. V., Podoltsev A. D., Radionova A. A. (2021). Magnetic field in the core of a magnetic fluid seal talking magnetic structural elements into account. 10p Publishing // *Journal of Physics Conference Series*, 1741, 012037

УДК 681.51 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.28

М. О. РИБАЛЬЧЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-5162-5201

О. Ю. ПОТАП
кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-8643-0228

М. В. МИХАЙЛОВСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0002-9960-6189

О. П. ЄГОРОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0002-9867-0437

В. І. ШИБАКІНСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0009-0003-4387-8315

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ STATEFLOW ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ В МЕТАЛУРГІЇ

У статті розглядається застосування програмного засобу Stateflow для моделювання складних систем у металургії. Акцентується увага на перевагах Stateflow як розширення системи Simulink, що дозволяє проектувати та моделювати подієво-керовані системи та кінцеві автомати, в тому числі ієрархічні моделі.

Проаналізовано дослідження та публікації, що стосуються використання Stateflow для моделювання систем логічного керування, до прикладу, у транспортних системах переміщення сипучих вантажів, а також у системах автоматичної сигналізації на залізничних переїздах.

Основною метою роботи є обґрунтування доцільності використання програмного засобу Stateflow для моделювання складних систем, зокрема технологічних процесів у металургії.

Представлено приклади моделювання металургійних процесів. Зокрема, розглянуто моделювання системи вибору вільної машини безперервного лиття заготівок (МБЛЗ). Виконано моделювання роботи агрегату «ківш-піч», який слугує для підігріву металу перед послідовними технологічними операціями та доводки розплаву за хімічним складом. Stateflow дозволяє формалізувати різні режими нагріву в залежності від ступенів потужності трансформатора, а також відстежувати зміну температури розплаву залежно від обраного режиму.

Окремо розглянуто моделювання системи управління формуванням багатокомпонентних порцій шихти на доменному конвеєрі. Модель системи управління враховує, що змішана порція може складатися з різних типів матеріалів (агломерат, окатиші, кокс), враховує їх співвідношення та розташування на конвеєрі, а також продуктивність збірного конвеєра. Stateflow-діаграма імітує роботу вагових воронок та визначає час включення механізмів розвантаження.

Зроблено висновок про доцільність використання Stateflow для моделювання процесів плавки, нагріву, транспортування та дозування матеріалів у металургії, що дозволяє підвищити ефективність управління технологічними процесами, забезпечити безпеку праці та якість продукції.

Ключові слова: *Matlab, Stateflow-діаграма, подієво-керовані системи, моделювання, металургія.*

M. O. RYBALCHENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0001-5162-5201

O. YU. POTAP
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0001-8643-0228

M. V. MYKHAILOVSKYI
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-9960-6189

O. P. YEHOROV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-9867-0437

V. I. SHYBAKINSKYI
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-9867-0437

USING THE STATEFLOW SOFTWARE TOOL FOR MODELING COMPLEX SYSTEMS IN METALLURGY

The article examines the application of the Stateflow software tool for modeling complex systems in metallurgy. Emphasis is placed on the advantages of Stateflow as an extension of the Simulink system, which allows designing and modeling event-driven systems and finite-state machines, including hierarchical models.

Recent research and publications concerning the use of Stateflow for modeling logical control systems, for example in transport systems for moving bulk cargo, and in automatic signaling systems at railway crossings, have been analyzed.

The main goal of the work is to substantiate the feasibility of using the Stateflow software tool for modeling complex systems, particularly technological processes in metallurgy.

Examples of modeling metallurgical processes are presented. Specifically, the modeling of a system for selecting a free continuous casting machine (CCM) is considered. Modeling of the «furnace-ladle» unit operation was performed, which serves to heat the metal before subsequent technological operations and to refine the melt's chemical composition. Stateflow allows formalizing various heating modes depending on the transformer power stages, and also tracking the change in melt temperature depending on the selected mode.

Separately, the modeling of the control system for forming multi-component charge portions on a blast furnace conveyor is discussed. The control system model takes into account that the mixed portion can consist of different types of materials (sinter, pellets, coke), their ratio and location on the conveyor, as well as the volumetric capacity of the collection conveyor. The Stateflow diagram simulates the operation of weighing hoppers and determines the activation time of unloading mechanisms.

A conclusion is drawn about the expediency of using Stateflow for modeling metal melting, heating, transportation, and material dosing processes in metallurgy, which allows increasing the efficiency of technological process control, ensuring safety and product quality.

Key words: *Matlab, Stateflow-diagram, event-driven systems, modeling, metallurgy.*

Постановка проблеми

З безлічі існуючих на сьогоднішній день пакетів візуального моделювання особливий інтерес викликають універсальні пакети, що не орієнтовані на визначену вузькоспеціальну область, а дозволяють моделювати структурно-складні гібридні системи у різних прикладних задачах. Серед них особливе місце займає Matlab [1].

Однією з основних причин широкого використання пакета Matlab є великий спектр засобів, що надається користувачеві для рішення різноманітних задач у різних областях людської діяльності. Серед цих засобів особливе місце займає підсистема Simulink. Simulink – це інтерактивне середовище для моделювання й аналізу широкого класу динамічних систем за допомогою блок-діаграм. У склад Simulink входить додаток Stateflow – графічний інструментарій для моделювання складних систем керування. Програмний засіб Stateflow є розширенням системи Simulink, який представляє собою середовище для побудови і моделювання подієво-керованих систем. Для моделювання кінцевих автоматів можна використовувати стандартні блоки системи Simulink, проте програмний засіб Stateflow забезпечує можливість функціонування кінцевих автоматів шляхом побудови ієрархічних моделей як підсистем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [2] авторами показано використання Stateflow для моделювання систем логічного керування. Розглядається доцільність використання Stateflow для побудови алгоритмів і програм системи логічного керування транспортною ділянкою переміщення сипучих вантажів. В роботі продемонстровано, як Stateflow дозволяє моделювати події, переходи станів і генерувати код для промислових контролерів (наприклад, Simatic в TIA Portal).

Stateflow дозволяє створювати моделі реактивних систем, перевіряти умови зациклення та порушення діапазону даних, реалізовувати паралельні операції та рекурсивні алгоритми управління [3]. Його можна використовувати для оптимізації процесів механічної обробки у гнучких виробничих системах, що дозволяє підвищити ефективність управління технологічними процесами.

Робота [4] присвячена імітаційному моделюванню електронної системи автоматичної переїзної сигналізації нового покоління для забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах. Основна мета – перевірка та вдосконалення алгоритму функціонування системи з урахуванням можливих відмов елементів і забезпечення відмовостійкості. Stateflow у цій роботі використано для опису поведінки системи у вигляді станів і переходів – тобто, для моделювання роботи системи як кінцевого автомата, де кожен стан відповідає певному режиму роботи або події (наприклад, рух поїзда, активація сигналізації, відмова елемента). Stateflow дозволяє чітко формалізувати алгоритм реагування системи на різні комбінації вхідних сигналів, зокрема на відмови окремих елементів (реле, датчиків, світлофорів).

У моделі враховано різні ситуації: рух поїзда в обох напрямках, аварійна зупинка, відмови елементів, затримки сигналів тощо. За допомогою Stateflow вдалося виключити конфліктні стани та зациклення, перевірити коректність роботи системи при відмовах.

Даний інструмент також є дуже перспективним для використання при моделюванні технологічних процесів у металургії [4]. Розглянемо кілька ключових аспектів, які роблять Stateflow корисним інструментом у цій галузі.

Металургійні процеси часто включають складні послідовності операцій, які залежать від різних умов і подій. Stateflow дозволяє чітко визначити ці послідовності за допомогою діаграм станів і переходів, що забезпечує точне моделювання логіки процесу. Наприклад, можна змоделювати послідовність операцій системи шихтоподачі в процесі формування порцій шихти для доменної печі.

Крім того, металургійні процеси вимагають точного керування для забезпечення якості продукції та безпеки. Stateflow можна використовувати для моделювання систем керування, які реагують на зміни параметрів процесу та виконують необхідні дії. Наприклад, можна змоделювати систему керування температурою в печі, яка регулює подачу палива та повітря залежно від показань датчиків.

Stateflow тісно інтегрований з Simulink, що дозволяє моделювати гібридні системи, які поєднують дискретні та безперервні компоненти. Це особливо корисно для моделювання процесів, де потрібно враховувати як логіку керування, так і фізичні процеси, такі як теплопередача та хімічні реакції. Можливо моделювати процеси плавки металу, де потрібно враховувати як логіку керування печами, так і динаміку теплопередачі в металі.

Існують випадки, коли технологічні процеси можуть бути схильні до різних подій та помилок, таких як відмова обладнання або відхилення параметрів процесу. Stateflow дозволяє визначити реакцію системи на ці події та помилки, що забезпечує надійну та безпечну роботу процесу. Це системи аварійного вимкнення обладнання у разі виникнення небезпечних ситуацій.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є обґрунтування доцільності використання програмного засобу Stateflow для моделювання складних систем, зокрема технологічних процесів у металургії.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо приклади складних систем, робота яких може бути змодельована за допомогою Stateflow.

Виконаємо моделювання системи вибору вільної машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Дана машина забезпечує квазібезперервне переведення рідкої сталі, що знаходиться в сталерозливному ковші, в твердий стан у вигляді заготовок певної геометричної форми.

Обробка металу виконується на тій МБЛЗ, яка є вільною в даний момент. Нижче приведена часова діаграма процесу (рис. 1).

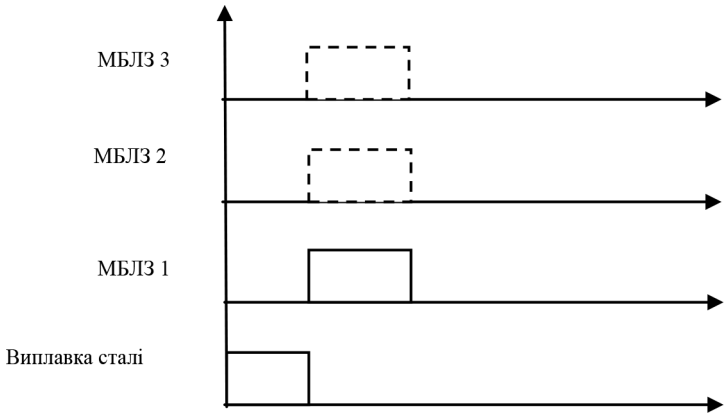


Рис. 1. Часова діаграма процесу

Stateflow діаграма, яка дозволяє змоделювати такий процес представлена на рис. 2. За замовчуванням активується стан Zero. Як тільки модельний час стає рівним 10 одиницям, виконується перехід до точки прийняття рішень. Змінній u присвоюється значення, яке буде відповідати номеру вільної МБЛЗ і виконується перехід до одного з трьох станів One, Two, Three. Значення змінної u змінюється в блоці Constant у Simulink.

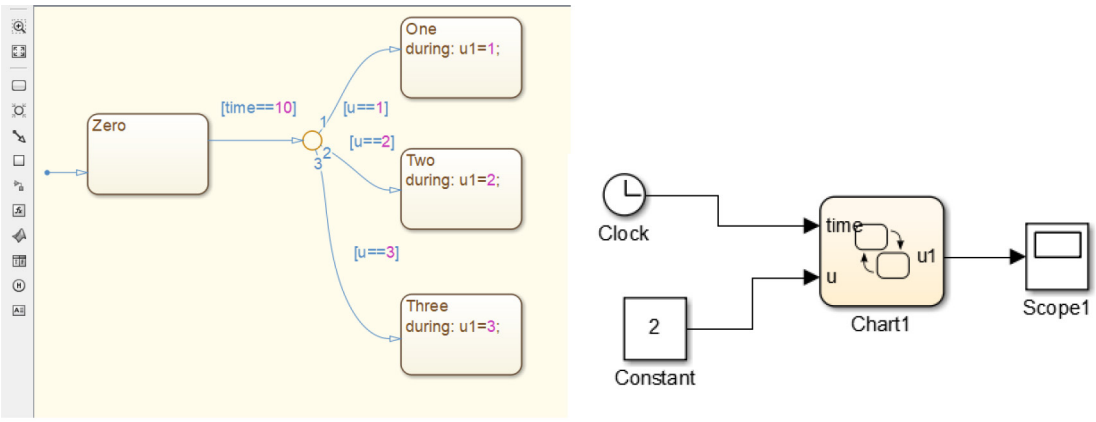


Рис. 2. Діаграма Stateflow та Simulink модель

В залежності від того, який з трьох станів (One, Two, Three) вибирається, змінній u1 за допомогою процедури *during* присвоюється значення 1, 2, 3 відповідно.

На рис. 3 та 4 представлено оглядач змінних та результати моделювання при u=2.

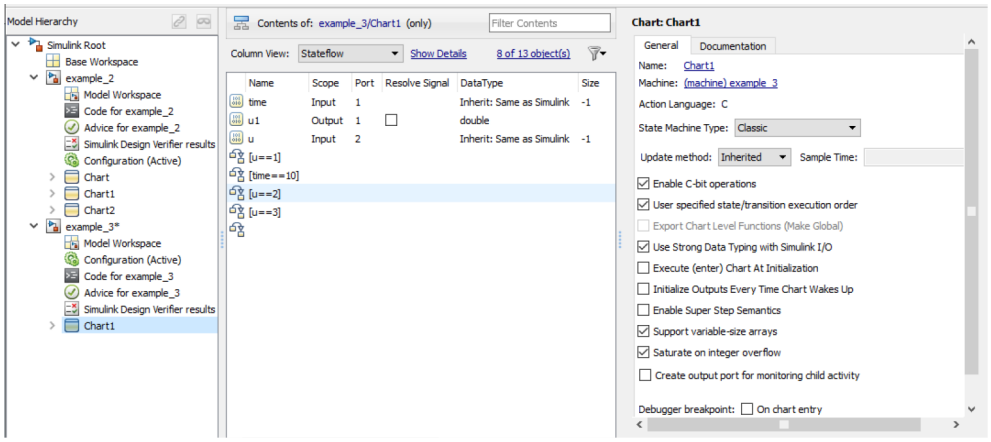


Рис. 3. Змінні та події змодельованої системи

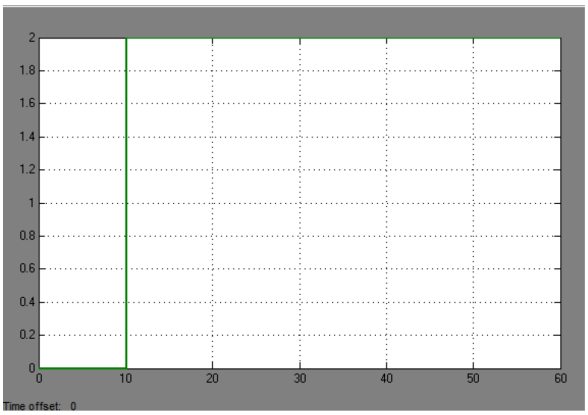


Рис. 4. Результати моделювання

Розглянемо тепер моделювання роботи агрегату «піч-ківш». Позапічна обробка – швидко розвиваючий, перспективний метод отримання високоякісної сталі. Порядок обробки ковшів на ділянці позапічної обробки сталі наступний: сталь, що виплавляють в металургійних цехах, розливають в ковші, виконують скачування шлаку на машині скачування шлаку, послідовно нагрівають та доводять за хімічним складом на установці «піч-ківш», після чого відправляють на вакуумну обробку.

Отже, одним з основних агрегатів позапічної обробки є установка «піч-ківш», яка слугує для підігріву металу перед послідовними технологічними операціями та доводці розплаву за хімічним складом.

Робота «печі-ковша» характеризується різними режимами нагріву в залежності від ввімкнення ступенів потужності трансформатора (4, 6, 8). Нагрів металу починають на низьких ступенях потужності, як правило, 4-й, поки не стабілізується робота електродів. Після переходять на більш високі ступені, і основний нагрів виконують на 8-й ступені до тих пір, поки не буде досягнута потрібна температура. Нижче приведена часова діаграм процесу (рис. 5).

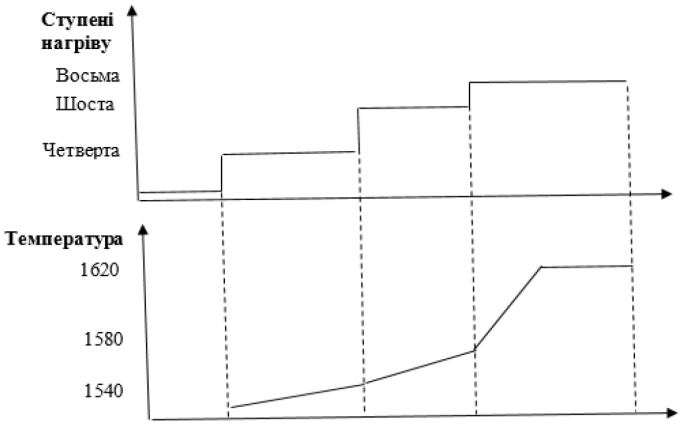


Рис. 5. Часова діаграма процесу

У вікні редактора Stateflow створюємо структурну схему моделі, як на рис. 6.

У Simulink потрібно до Stateflow моделі додати блоки, які дозволять генерувати дані. На рис. 7 показано загальний вигляд моделі Simulink.

Опишемо роботу створеної моделі.

За замовчуванням активізується стан 1. Як тільки функція LHF1, що задається із Simulink в блоці *Step* стає рівною 1, починається нагрів металу на установці «піч-ківш» і відбувається перехід до стану 2. В залежності від значення функції *Stupen*, відбувається послідовне перемикання станів, імена яких відповідають номерам ступенів потужності трансформатора. Спочатку активізується стан 3 (виконується умова переходу [Stupen==4]). У цьому стані відбувається зміна температури розплаву *T* наступним чином:

```
during: T0+dT4*(time-time1);
exit: temp=T; time1=time.
```

Як тільки значення змінної *Stupen* перестає бути рівним 4 (виконується умова переходу [Stupen!=4]), виконується перехід до точки прийняття рішення, а потім до стану 6. Стан 6 має наступні процедури:

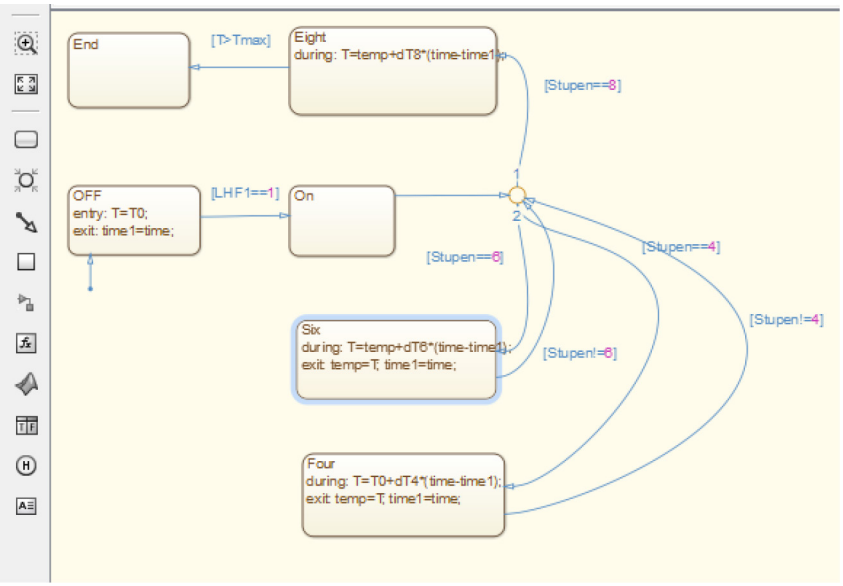


Рис. 6. Загальний вигляд діаграми Stateflow

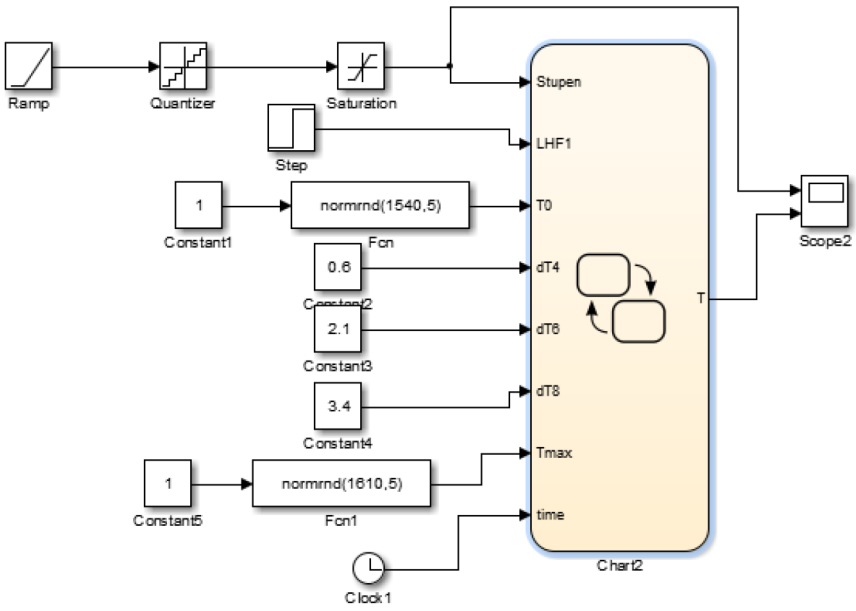


Рис. 7. Загальний вигляд моделі Simulink

```
during: temp+dT6*(time-time1);
exit: temp=T; time1=time.
```

А стан 8 такий: *during: temp+dT8*(time-time1).*

Як видно, під час кожного із станів змінюється температура розплаву *T*. Змінна *T* є вихідною і відображається на графіку моделювання. Швидкості нагріву розплава в залежності від ступені потужності (вихідні змінні *dT4, dT6, dT8*) задаються з моделі Simulink.

Як тільки значення температури T стає більше ніж задана температура нагріву T_{max}, виконується перехід до стану Кінець і модель Stateflow завершує свою роботу.

Крім швидкості нагріву *dT* та заданої температури нагріву T_{max}, на час роботи моделі також впливає початкова температура T_0. Вона також задається з Simulink. Значення цієї змінної повинно бути в діапазоні 1520–1580 °C.

В блоці Fcn моделі Simulink для завдання випадкового розподілення значення температури T_0 використовується формула: normrnd(m_{1x}, σ_x). Для завдання випадкового розподілення значення температури в блоці Fcn1 вводимо формулу: normrnd(m_{2x}, σ_x).

Таблиця змінних моделі представлена на рис. 8.

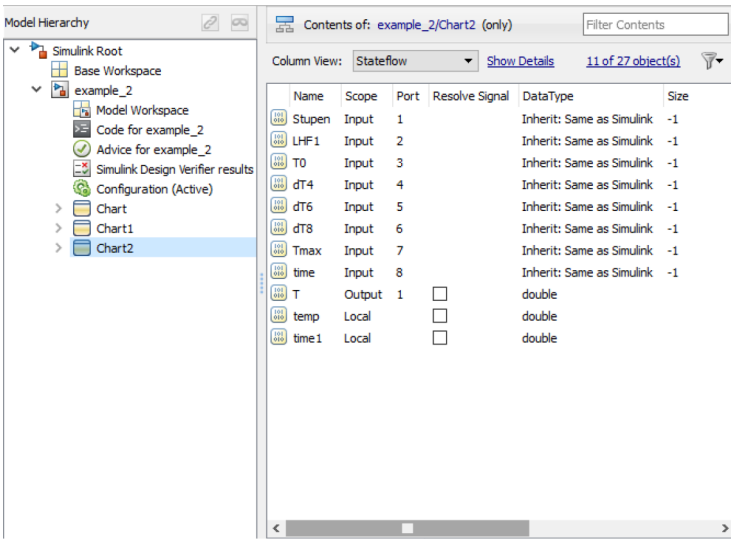


Рис. 8. Таблиця змінних моделі

На рис. 9 приведені результати моделювання.

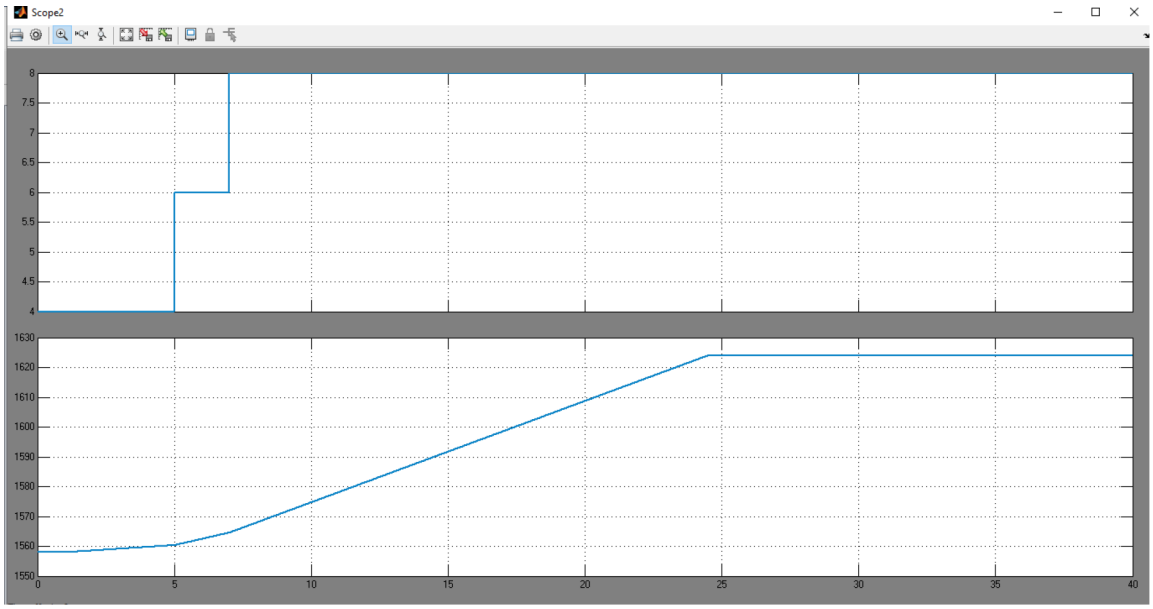


Рис. 9. Фінальні результати моделювання

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що отримані графіки відповідають діаграмі процесу, що була приведена на рис. 6.

Розглянемо більш складну систему управління формуванням багатокопонентних порцій шихти на доменному конвеєрі [6]. Оскільки процес функціонування системи шихтоподачі розглядається як послідовна зміна її станів при транспортуванні доз агломерату, окатишів і коксу, то для моделювання роботи системи шихтоподачі з можливістю формування на конвеєрі багатокомпонентної порції обраний саме Stateflow. Модель цього процесу представлена на рис. 10.

Перед початком моделювання за заданою програмою завантаження доменної печі визначають багатокомпонентну змішану порцію у вигляді послідовних ділянок на збірному конвеєрі, на яких кількість і співвідношення змішування компонентів постійно. Таким чином, у Simulink-моделі вихідними даними для моделювання є маса компонентів на кожній з ділянок, насипна маса шихтових матеріалів, об'ємна продуктивність збірного конвеєра. Також визначаються вагові воронки, що беруть участь у процесі формування багатокомпонентної порції.

Внутрішня структура моделі – основна діаграма станів та їх переходів StateChart, представлена на рис. 11.

Блок «Система управління» розраховує відповідно до заданої багатокомпонентної порції необхідну витрату кожного компонента в межах ділянки.

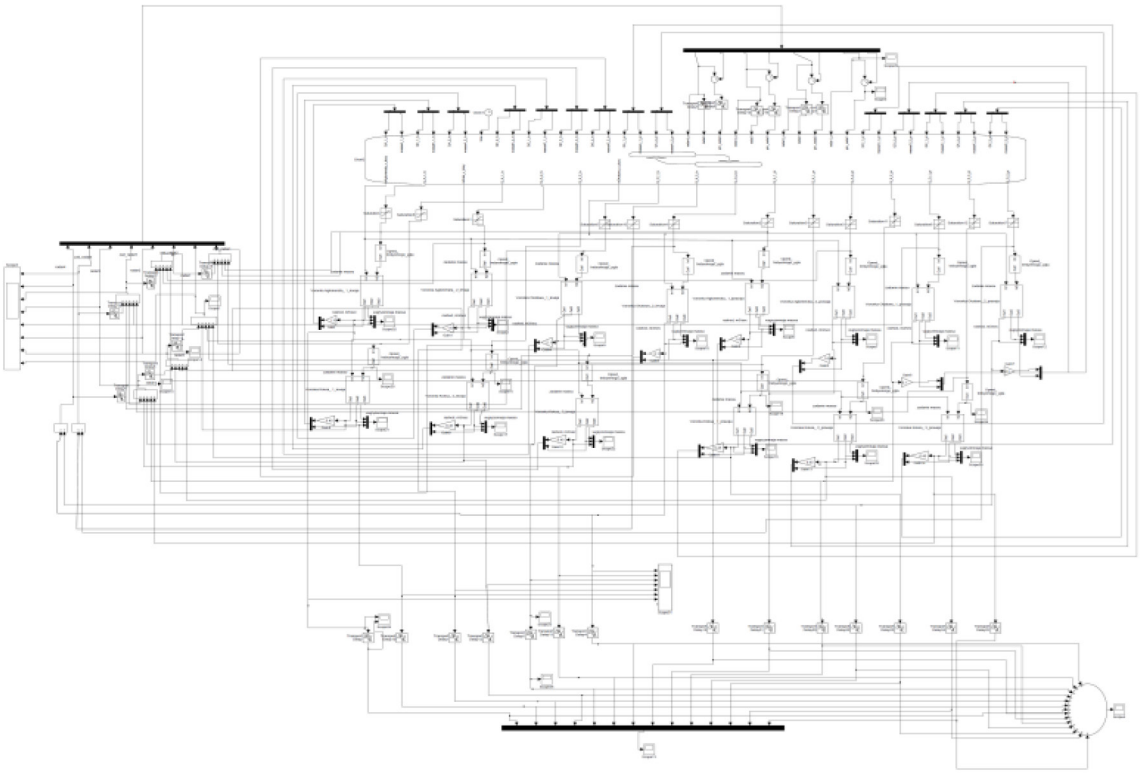


Рис. 10. Загальний вигляд Simulink-моделі

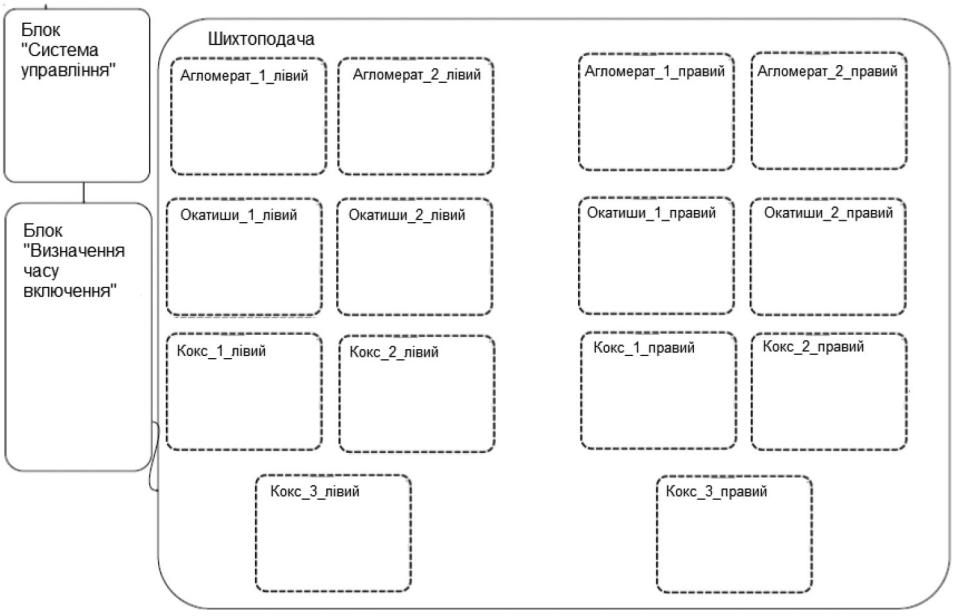


Рис. 11. Структура Stateflow-моделі

Блок «Визначення часу включення» визначає прогнозовані часові тривалості головних та хвостових частин дози в межах ділянки, а також час включення механізмів розвантаження при прямій послідовності роботи вагових воронок.

Основний блок «Шихтоподача» включає 14 паралельних блоків, які можуть бути активні одночасно: 4 блоки для імітації роботи вагових бункерів агломерату – Агломерат_1_лівий, Агломерат_2_лівий, Агломерат_1_правий, Агломерат_2_правий; 4 блоки для імітації роботи вагових бункерів окатишів – Окатиші_1_лівий, Окатиші_2_лівий, Окатиші_1_правий, Окатиші_2_правий, 6 блоків для імітації роботи вагових бункерів коксу – Кокс_1_лівий, Кокс_2_лівий, Кокс_3_лівий, Кокс_1_правий, Кокс_2_правий, Кокс_3_правий. Кожен із цих станів працює незалежно від інших. Стан стає активним, якщо спрацьовує умова переходу, що веде до цього стану.

Кожна з 14 подій включає вкладені ексклюзивні стани, що характеризують готовність вагової воронки до вивантаження і розвантаження шихти на 1, 2, …, *i*-й ділянці (рис. 12).

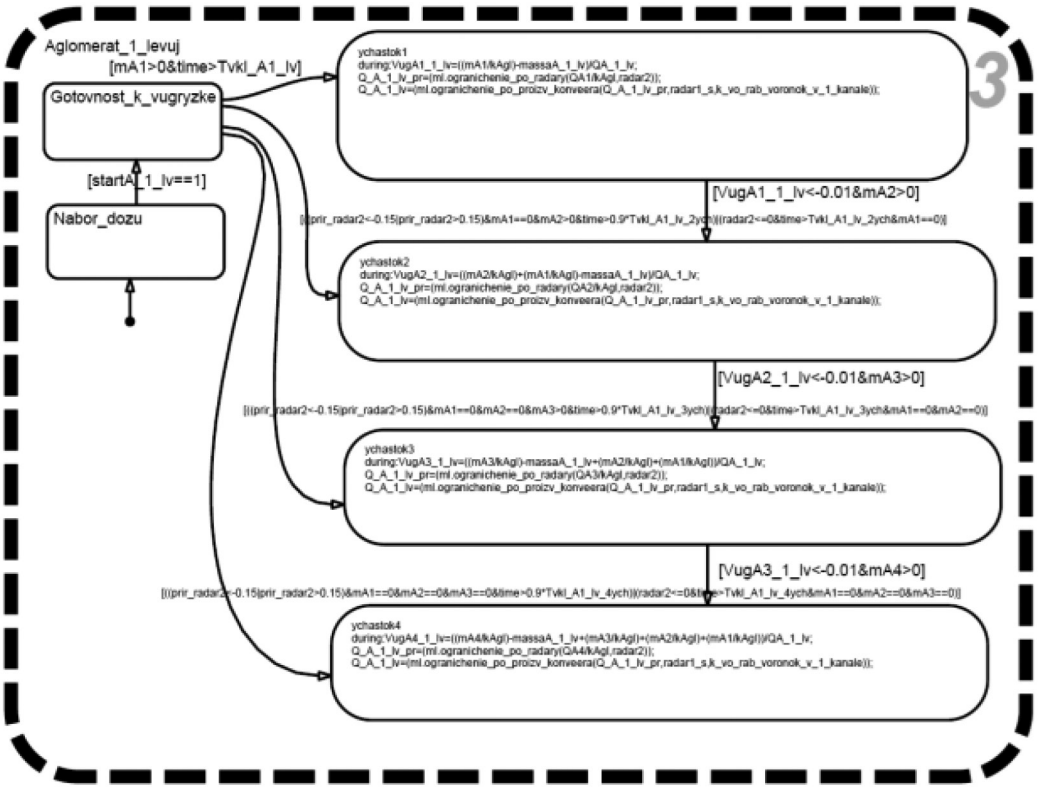


Рис. 12. Діаграма Stateflow, що імітує роботу вагової воронки

Крім Stateflow-діаграми Simulink-модель містить також 14 моделей систем регулювання дозуванням матеріалу.

Розглянемо модель формування порції, структура якої представлена на рис. 13. Задаються наступні параметри: $m_A/1 = 30$ т – маса агломерату на першій ділянці, $m_K/1 = 10$ т – маса коксу на першій ділянці; $m_O/2 = 20$ т – маса окатишів на другій ділянці; $\gamma_A = 1{,}6$ т/м^3 – насипна маса агломерату, $\gamma_K = 0{,}45$ т/м^3 – насипна маса коксу, $\gamma_O = 2{,}1$ т/м^3 – насипна маса окатишів; П = 0,8 м^3/с – об'ємна продуктивність збірного конвеєра. Для вивантаження обрані вагові бункери Кокс_3_лівий, Агломерат_1_лівий та Окатиші_1_лівий.



Рис. 13. Структура заданої порції

Результати моделювання наведені на рис. 14–18.

На рисунках 14–16:

1 – графік зміни кута відкриття затвора вагової воронки в градусах;

2 – вивантажена маса у тонах;

3 – завантаження матеріалом доменного конвеєра.

Аналіз графіків, отриманих в процесі моделювання, дозволив встановити, що розроблена модель дозволяє формувати змішані порції, що складаються з будь-якої кількості матеріалів, з урахуванням заданого розташування компонентів та їх співвідношення в порції, змінної геометрії сипучого матеріалу, що розвантажується з вагової воронки, та сумарної об'ємної продуктивності конвеєра.

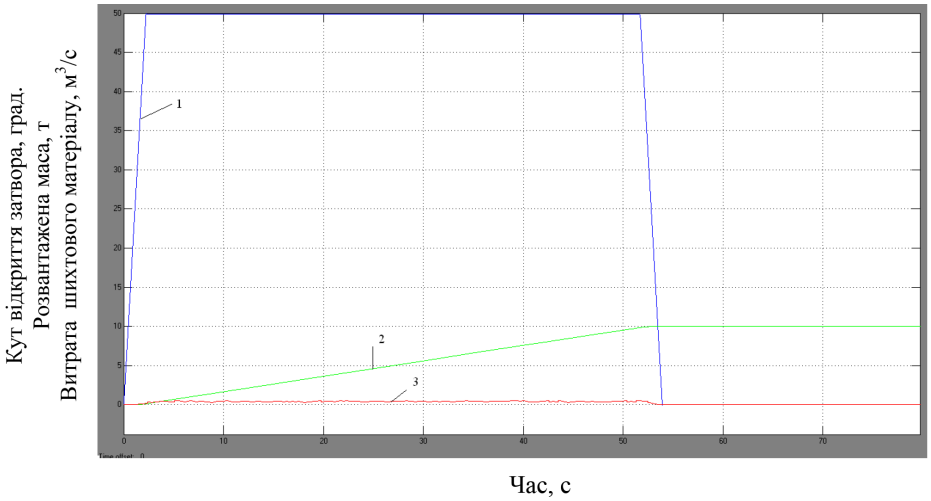


Рис. 14. Робота вагової воронки Кокс_3_лівий

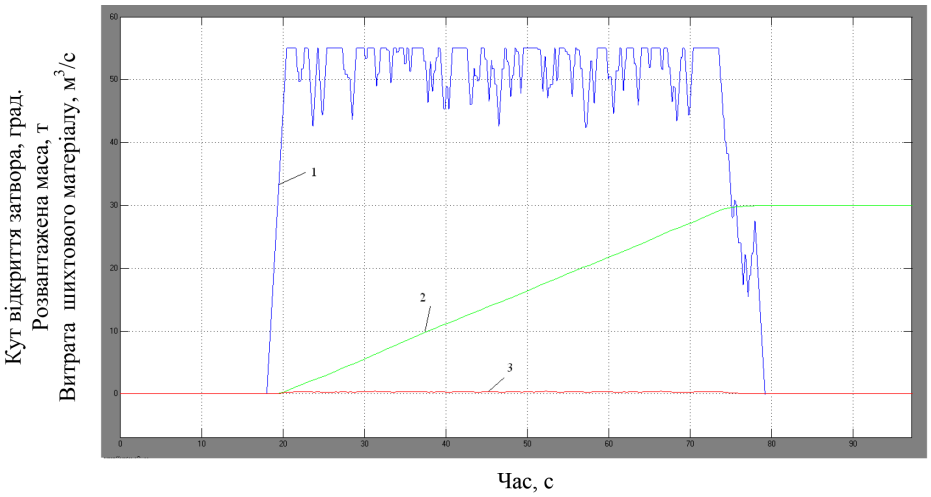


Рис. 15. Робота вагової воронки Агломерат_1_лівий

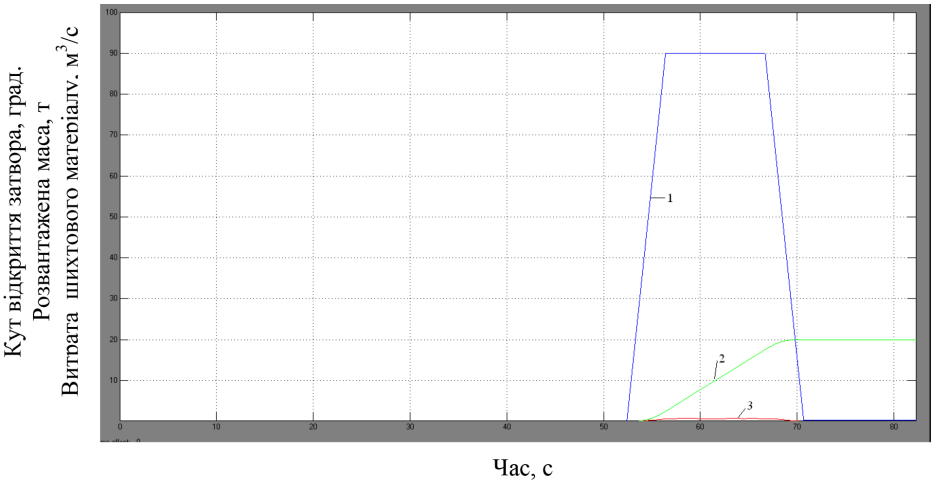


Рис. 16. Робота вагової воронки Окатиші_1_лівий

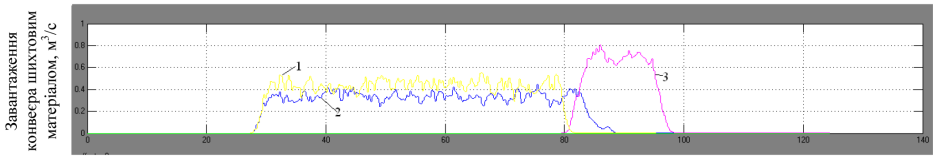


Рис. 17. Накладення в часі графіків зміни витрат компонентів: 1 – графік зміни витрати агломерату; 2 – графік зміни витрати коксу; 3 – графік зміни витрати окатишів

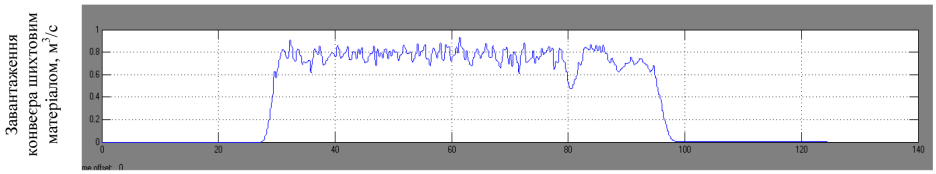


Рис. 18. Завантаження матеріалом конвеєра

Висновки

Таким чином, наведені приклади підтвердили доцільність використання програми Stateflow для:

– моделювання процесів плавки та розливання металу;
– моделювання систем керування доменними печами;
– моделювання систем керування транспортними системами в металургійних цехах.

Список використаної літератури

1. Documentation MathWorks [Електронний ресурс] // Офіційний інтернет-сайт MathWorks. URL: https://de.mathworks.com/help/

2. Левінський, М. В., Левінський, В. М. Використання Stateflow для побудови алгоритмів і програм системи логічного керування транспортною ділянкою переміщення сипучих вантажів. Збірник наукових праць Національного університету «Одеська морська академія», 1 (60). С. 122–132.

3. Веселовська Н. Р. Практична реалізація методики управління процесом механічної обробки. / Н. Р. Веселовська // Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця. 2020. № 1(108). С. 91–102.

4. Муха Ар. А. Моделювання алгоритму функціонування АПС-ЕГ засобами пакету MATLAB Simulink+Stateflow // Математичні машини і системи. 2013. № 4. С. 179–187.

5. Кукушкін О. М., Бейцун С. В., Жаданос О. В., Рубцов Д. А. Аналіз складних систем: Навчальний посібник. Дніпропетровськ : ДІПОпром, 2007. 68 с.

6. A Model to Control the Formation of Multi-Component Charge Portions on a Blast Furnace Conveyor / Rybalchenko, M.O., Selegej, A.M., Golovko, V.I., Selegej, S.M., Mirgorodskaya, O.S.// Science and Innovation – Volume 16(6). 2020. P. 36–45. (Web of Scince ISSN 2413-497X (Ukrainian ed. Online) ISSN 1815-2066 (Ukrainian ed. Print) https://doi.org/10.15407/scine16.06.036

References

1. Documentation MathWorks [Electronic resource] // Official MathWorks website. URL: https://de.mathworks.com/help/

2. Levinsky, M. V., Levinsky, V. M. Using Stateflow to build algorithms and programs for the logical control system of the transport section of bulk cargo movement. Collection of scientific papers of the National University “Odesa Maritime Academy”, (1(60)), P. 122–132.

3. Veselovska N. R. Practical implementation of the method of controlling the mechanical processing process. / N. R. Veselovska // Technology, energy, transport of the agricultural complex. Vinnytsia. 2020. No. 1(108). P. 91–102.

4. Mukha A. A. Modeling the algorithm of the APS-EG functioning using the MATLAB Simulink+Stateflow package // Mathematical machines and systems. – 2013. No. 4. P. 179–187.

5. Kukushkin O. N., Beitsun S. V., Zhadans A. V., Rubtsov D. A. Analysis of complex systems: tutorial. Dnipropetrovsk : GIPOprom, 2007. 68p.

6. A Model to Control the Formation of Multi-Component Charge Portions on a Blast Furnace Conveyor/ Rybalchenko, M. O., Selegej, A. M., Golovko, V. I., Selegej, S. M., Mirgorodskaya, O. S.// Science and Innovation. Volume 16(6). 2020. C.36–45. (Web of Scince ISSN 2413-497X (Ukrainian ed. Online) ISSN 1815-2066 (Ukrainian ed. Print)) https://doi.org/10.15407/scine16.06.036

УДК 621.311 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.29

О. Ю. САВОЙСЬКИЙ
кандидат технічних наук,
завідувач кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6459-4931

В. М. КОЗІН
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9821-7774

В. Ф. СІРЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-0831-6563

Т. С. ВОЛЬВАЧ
асистент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-8890-6901

Ю. В. СІРЕНКО
доктор філософії з галузі знань галузеве машинобудування, доцент,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-1818-3653

О. В. РЯСНА
старший викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-6917-6950

АНАЛІЗ ПРИЧИН ВІДКЛЮЧЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ

У роботі досліджено причини аварійних відключень високовольтних ліній електропередачі напругою 110 кВ у системі електропостачання Сумської області за період 2015–2023 рр. Проведено аналіз статистичних даних аварійних відключень, визначено динаміку та структуру причин їх виникнення. Встановлено, що за досліджуваний період зафіксовано 66 випадків відключень, з яких 15,2 % сталося через невстановлені причини. Виявлено, що найбільша кількість аварійних відключень припадає на літньо-осінній період. Детальний аналіз структури встановлених причин аварійних відключень показав, що найбільшу частку становлять атмосферні перенапруги, які складають 29 % від загальної кількості. Перекриття та забруднення ізоляції є другою за значимістю причиною, кожна з яких складає більше 20 %.

Для оцінки рівня невизначеності та випадковості процесів відмов у системі електропостачання використано метод інформаційної ентропії. Отримані результати визначення інформаційної ентропії свідчать про збільшення невизначеності в процесах виникнення аварійних відключень, що спричинено зростанням зовнішніх впливів, деградацією обладнання та нестабільністю експлуатаційних параметрів мережі.

Наведено рекомендації для зниження кількості аварійних відключень, дотримання яких дозволить покращити надійність та стабільність роботи системи електропостачання, зменшити ризик виникнення непередбачуваних відмов, знизити недовідпуск електричної енергії споживачам.

Отримані результати можуть бути використані при складанні графіків планово-попереджувальних ремонтів з метою забезпечення встановленого рівня надійності електричного обладнання та попередження несправностей та зношування високовольтних ліній електропередачі.

Ключові слова: *надійність електропостачання, аварійні відключення, атмосферні перенапруги, перекриття ізоляції, діагностика обладнання, профілактичне обслуговування, проєктування ЛЕП, інформаційна ентропія.*

O. YU. SAVOISKYI
Candidate of Technical Sciences,
Head of Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6459-4931

V. M. KOZIN
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9821-7774

V. F. SIRENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-0831-6563

T. S. VOLVACH
Assistant at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-8890-6901

YU. V. SIRENKO
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-1818-3653

O. V. RYASNAYA
Senior Lecturer at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-6917-6950

ANALYSIS OF HIGH-VOLTAGE POWER TRANSMISSION LINE OUTAGES IN THE ELECTRICAL NETWORKS OF SUMY REGION

The study examines the causes of emergency outages of 110 kV high-voltage power transmission lines in the power supply system of Sumy region for the period 2015–2023. A statistical analysis of emergency outages was conducted, identifying the dynamics and structure of their causes. It was established that 66 cases of outages were recorded during the study period, 15.2 % of which occurred due to unidentified causes. It was found that the highest number of emergency outages occurred in the summer-autumn period. A detailed analysis of the structure of identified outage causes showed that the largest share is attributed to atmospheric overvoltages, accounting for 29 % of the total number. Insulation flashovers and contamination are the second most significant causes, each accounting for more than 20 %.

To assess the level of uncertainty and randomness in failure processes within the power supply system, the method of information entropy was applied. The obtained results indicate an increase in uncertainty in the occurrence of emergency outages, which is caused by the growing impact of external factors, equipment degradation, and instability of the network's operational parameters.

Recommendations for reducing the number of emergency outages are provided. Compliance with these recommendations will improve the reliability and stability of the power supply system, reduce the risk of unforeseen failures, and decrease the amount of unserved electrical energy for consumers.

The obtained results can be used in the development of scheduled preventive maintenance plans to ensure the established reliability level of electrical equipment and prevent failures and wear of high-voltage power transmission lines.

Key words: *power supply reliability, emergency outages, atmospheric overvoltages, insulation breakdown, equipment diagnostics, preventive maintenance, power transmission line design, information entropy.*

Постановка проблеми

Проблема надійності електропостачання є однією з ключових у сучасній електроенергетиці, особливо в регіонах з високим рівнем зношеності електромереж та значними зовнішніми впливами. Високовольтні лінії електропередачі (ЛЕП) є основними магістралями, що транспортують електроенергію до кінцевих споживачів, а їхні відключення впливають на функціонування промислових підприємств, соціальної інфраструктури та побутових користувачів. Однак у процесі експлуатації вони піддаються впливу різноманітних негативних факторів, які можуть призводити до аварійних відключень. Зниження надійності ЛЕП негативно позначається на стійкості всієї електроенергетичної системи, викликаючи перебої в роботі споживачів, економічні збитки та підвищення витрат на ремонт і обслуговування мереж.

Забезпечення вимог до якості електроенергії, а також кліматичні зміни, що збільшують ризик несприятливих умов для роботи ЛЕП, роблять дослідження причин аварійних відключень ліній особливо актуальними в умовах зростаючого енергоспоживання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведені попередні наукові дослідження підтверджують важливість глибокого аналізу причин відключень ЛЕП. У роботах [1, 2] виділено вплив перенапруг як одного з основних факторів, що можуть спричиняти вихід із ладу елементів ліній електропередачі високої напруги. Перенапруги, які виникають внаслідок грозових явищ, комутаційних операцій або резонансних явищ, можуть призводити до пошкодження ізоляції та обладнання. Авторами детально досліджено аномальні перенапруги в магістральних електричних мережах з джерелами спотворень, підкреслюючи важливість врахування резонансних явищ для запобігання аварійним відключенням.

Дослідження зовнішніх факторів, таких як кліматичні умови, було розглянуто в роботах [3–6]. Автори зазначають, що погодні явища, включаючи сильний вітер, обмерзання проводів і грозову активність, є значними чинниками, які впливають на працездатність ЛЕП. У роботі зроблено висновок, що регулярний моніторинг стану обладнання та своєчасне обслуговування є ключовими для запобігання аварій.

У роботах [3, 7, 8] проведено огляд причин відключень електроенергії, серед яких виділено технічні несправності, природні явища та перевантаження системи. Автори підкреслюють важливість впровадження сучасних технологій моніторингу для зниження частоти відключень.

Авторами [9, 10] проаналізовано випадки відключень ЛЕП під час екстремальних снігових та льодових умов. Обґрунтовано необхідність удосконалення конструкцій ліній та впровадження систем обігріву для запобігання обледенінню. У звіті Національної лабораторії з відновлюваної енергії США (NREL) [11] розглянуто ризики виникнення лісових пожеж, спричинених енергетичною інфраструктурою, та запропоновано стратегії зниження цих ризиків, включаючи модернізацію обладнання та впровадження систем раннього виявлення.

Вітчизняний та міжнародний досвід свідчить про важливість комплексного підходу до вирішення проблеми аварійних відключень ЛЕП, що включає як технічні заходи, так і організаційні стратегії, адаптовані до специфічних умов експлуатації мережі. Враховуючи специфіку електромереж Сумської області, необхідно адаптувати загальні рекомендації до місцевих умов, зокрема, враховуючи кліматичні особливості та стан інфраструктури. Аналіз існуючих публікацій свідчить про актуальність та необхідність подальших досліджень у цьому напрямі для розробки ефективних заходів зменшення аварійних відключень високовольтних ЛЕП.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз причин аварійних відключень високовольтних ліній електропередачі в електромережах Сумської області із визначенням інформаційної ентропії для оцінки невизначеності цих процесів та розробки рекомендацій щодо підвищення надійності електропостачання.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі досліджено причини та кількість аварійних відключень чотирьох живлячих ліній електропередачі напругою 110 кВ районної трансформаторної підстанції 110/35/10 кВ Сумського району Сумської області. Серед численних абонентів регіону присутні всі три категорії споживачів по надійності електропостачання. Тому відключення живлячих ліній 110 кВ призводить до колосальних збитків. Відомості про аварійні відключення повітряних ліній, отримані із оперативних журналів диспетчерського персоналу енергокомпанії, що обслуговує даний район електропостачання. Статистичні дані про аварії на повітряних лініях отримані за період 2015–2023 рр. Аварійні відключення, обумовлені обстрілами держави-агресора, при обробці даних не враховувалися.

На рис. 1 показано кількість аварійних відключень високовольтних ліній електропередачі напругою 110 кВ у період із 2015 до 2023 року, розподілену за встановленими та невстановленими причинами виникнення.

Аналіз отриманих даних рис. 1 показує, що за досліджуваний період було зафіксовано 66 аварійних відключення, з яких 56 були зі встановлених причин. У 2015 році було зафіксовано 6 аварій, усі з яких мали встановлені причини. У 2016 і 2017 роках кількість аварій помітно знизилася.

Починаючи з 2018 року, кількість відключень знову почала зростати. У 2018 році було зафіксовано 6 аварій, одна з яких мала невстановлену причину. У 2019 році кількість відключень становила 4 випадки, причому вже

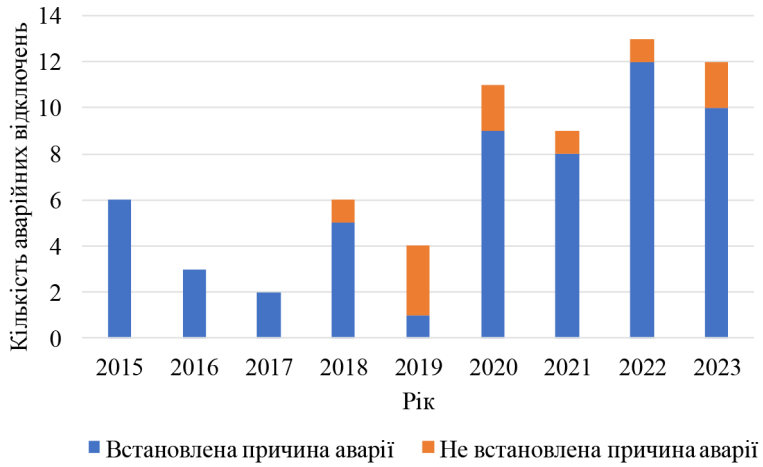


Рис. 1. Динаміка аварійних відключень ЛЕП за 2015–2023 рр.

3 з них мали невстановлені причини. У 2020 році спостерігалося значне зростання кількості аварій – до 11 випадків, із яких 2 залишилися без встановленої причини.

У 2021 році кількість аварійних відключень досягла 9, із яких одне мало невстановлену причину. Найвищі показники аварійності були зафіксовані у 2022 та 2023 роках – 13 та 12 відключень, із яких без встановлених причин у 2022 році відбулося 1 відключення, а у 2023 році – 2. Загальна кількість аварій через невстановлені причини за досліджуваний період становила 10 відключень, що складає 15,2 % від загального числа подій.

Розподіл аварійних відключень повітряних ліній за місяцями року за 2015–2023 рр. (рис. 2) показує, що найбільше аварійних відключень стається влітку та восени. Очевидно, це пояснюється забрудненням ізоляторів та впливом кліматичних умов (вітрові навантаження, атмосферні перенапруги, тощо). Водночас, більшість відключень були короткочасними завдяки надійній роботі автоматичного повторного включення ліній.

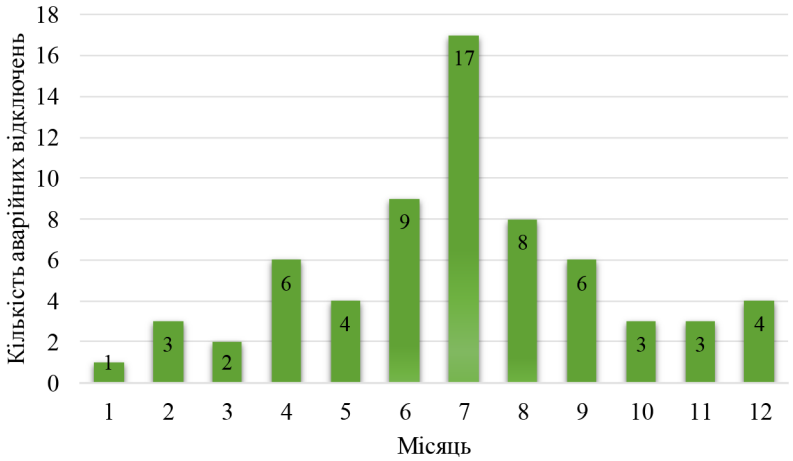


Рис. 2. Кількість аварійних відключень по місяцям протягом 2015–2023 рр.

Детальний аналіз структури встановлених причин аварійних відключень (рис. 3) показує, що найбільшу частку становлять атмосферні перенапруги, які складають 29 % від загальної кількості. Перекриття та забруднення ізоляції є другою за значимістю причиною, кожна з яких складає більше 20 %.

Птахи спричинили 14 % аварійних відключень, що свідчить про важливість урахування їхньої взаємодії з ЛЕП, особливо в районах із високою концентрацією птахів. Аварійні відключення через пошкодження у споживачів становлять найменшу частку – 12 %, але вони все одно залишаються значущим фактором, який може бути пов'язаним із фізичним зносом обладнання або аварійними ситуаціями внаслідок інших причин.

Результати аналізу показують специфіку географічного та кліматичного розташування повітряних ліній електропередачі. Чинні карти, що відображають райони електромереж за вітровими та ожеледними навантаженнями, а також за кількістю грозових годин протягом року, були створені понад три десятиліття тому. Наразі вони лише частково відповідають реальним умовам експлуатації ліній, що обумовлено змінами клімату в регіоні. Зокрема, на пошкодження ізоляційних матеріалів суттєво впливають температурні коливання протягом доби, а також зростання популяції місцевих і мігруючих птахів [12].



Рис. 3. Структура аварійних відключень зі встановлених причин

Таким чином виявлено, що більшість причин відключень пов'язана з технічним станом обладнання та впливом природних чинників, що вимагає як удосконалення конструктивних рішень для ЛЕП, так і підвищення якості обслуговування та моніторингу мережі.

Під час експлуатації електричних систем випадкові збої в роботі обладнання свідчать про вплив непередбачуваних факторів. Серед них виділяють кліматичні умови, взаємодію з живими організмами (людиною, тваринами, птахами), вітрові навантаження, утворення ожеледі, а також природне старіння і зношення обладнання. До цього додаються можливі помилки в роботі автоматичних систем управління та захисту. Більшість цих факторів має ймовірнісну природу. Тому важливе значення має збір статистичних даних про такі події, їх реєстрація диспетчерами на підстанціях і у диспетчерських пунктах для подальшого аналізу стану електрообладнання.

Серед методів аналізу статистичних даних про технічний стан обладнання часто використовується ентропійний підхід [13]. Цей метод базується на визначенні інформаційної ентропії, яка є мірою невизначеності даних.

Інформаційна ентропія є кількісною характеристикою невизначеності процесу, що описує рівень хаотичності та непередбачуваності відмов у мережі. Обчислення ентропії дозволить отримати уявлення про стан повітряних ліній упродовж тривалого часу, а також визначити чинники, які сприяють прискореному зносу ізоляції, аналізувати причини відмов і виявляти слабкі місця мережі з точки зору надійності.

Відповідно до формули Шеннона [13]:

$$H = -\sum_{i=1}^{N} p_i \log_2 p_i, \tag{1}$$

де H – значення інформаційної ентропії; N – кількість подій у системі, які підлягають аналізу; p_i – імовірність появи i-ї події.

Кількість подій у системі (протягом року), які підлягають аналізу:

$$N = n_1 + n_2 + ... + n_i, \tag{2}$$

де n_i – число аварійних відключень і-го виду.

Імовірність відключення повітряної лінії:

$$q_i = \frac{n_i}{N}. \tag{3}$$

Відповідно до виразу (1) ентропія кожної з можливих подій:

$$H_i = -q_i \log q_i. \tag{4}$$

Ентропія за досліджуваний рік:

$$H_k = \sum_{i=1}^{N} H_i. \tag{5}$$

Результати розрахунків за виразами (1–5) наведені в таблиці 1.

На основі отриманих даних таблиці 1 отримано графік інформаційної ентропії аварійних відключень повітряних ліній, наведений на рис. 4.

Таблиця 1

Результати визначення інформаційної ентропії

Рік	Показник	Атмосферні перенапруги	Перекриття ізоляції	Забруднення ізоляції	Пошкодження в мережі	Не встановлені причини	Сумарна ентропія
2015	n_i	3	2	1	0	0	–
	q_i	0,5	0,333	0,167	0	0	–
	H_i	0,5	0,528	0,431	0	0	1,459
2016	n_i	1	1	1	0	0	–
	q_i	0,333	0,333	0,333	0	0	–
	H_i	0,528	0,528	0,528	0	0	1,585
2017	n_i	1	1	0	0	0	–
	q_i	0,5	0,5	0	0	0	–
	H_i	0,5	0,5	0	0	0	1,000
2018	n_i	1	3	1	0	1	–
	q_i	0,167	0,5	0,167	0	0,167	–
	H_i	0,431	0,5	0,431	0	0,431	1,792
2019	n_i	0	1	0	0	3	–
	q_i	0	0,250	0	0	0,750	–
	H_i	0	0,500	0	0	0,311	0,811
2020	n_i	2	5	0	2	2	
	q_i	0,182	0,455	0	0,182	0,182	
	H_i	0,447	0,517	0	0,447	0,447	1,859
2021	n_i	1	4	1	2	1	–
	q_i	0,111	0,444	0,111	0,222	0,111	–
	H_i	0,352	0,520	0,352	0,482	0,352	2,059
2022	n_i	2	3	6	1	1	–
	q_i	0,154	0,231	0,462	0,077	0,077	–
	H_i	0,415	0,488	0,515	0,285	0,285	1,988
2023	n_i	5	2	1	2	2	–
	q_i	0,417	0,167	0,083	0,167	0,167	–
	H_i	0,526	0,431	0,299	0,431	0,431	2,117

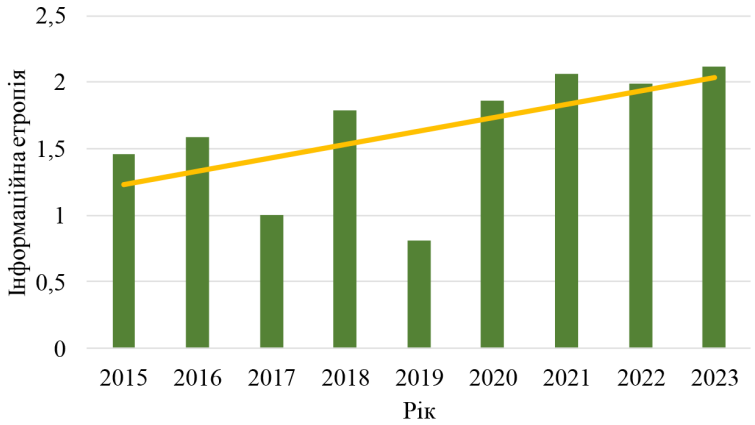


Рис. 4. Графік інформаційної ентропії аварійних відключень повітряних ліній

Аналіз отриманих даних (рис. 4) показує наявність коливань значень ентропії у різні роки, з мінімальними значеннями у 2017 та 2019 роках, що є наслідком реалізації ефективних заходів з технічного обслуговування, часткової модернізації мереж та інших управлінських рішень, спрямованих на підвищення надійності системи електропостачання.

Підвищення рівня інформаційної ентропії свідчить про зниження прогнозованості роботи системи електропостачання, що ускладнює ідентифікацію критичних факторів ризику та потребує удосконалення методів діагностики та профілактичного обслуговування. Якщо тенденція до зростання ентропії збережеться, це може призвести до підвищення частоти відмов та зниження рівня надійності електромережі. Тому необхідним є розроблення комплексних підходів щодо підвищення стійкості мережі та мінімізації впливу випадкових факторів на її експлуатаційні характеристики.

У таблиці 2 наведено рекомендації щодо зменшення аварійних відключень ЛЕП для всіх видів їх причин виникнення, що розглядаються в роботі.

Таблиця 2

Заходи щодо зменшення аварійних відключень ЛЕП

№ з/п	Причина відключення	Заходи
1.	Атмосферні перенапруги	1. Перегляд існуючих кліматичних карт для проектування нових ЛЕП. 2. Підсилення конструкцій існуючих ЛЕП. 3. Установка лінійних обмежувачів перенапруги (ОПН) та довго-іскрових розрядників (РДІП, РДІШ)
2.	Забруднення ізоляції	1. Періодичне чищення ізоляції. 2. Змазування ізоляції гідрофобними пастами
3.	Перекриття ізоляції	1. Профілактичне очищення ізоляторів. 2. Підсилення ізоляційних проміжків. 3. Гідрофобізація поверхонь ізоляторів
4.	Птахи	1. Використання полімерних ковпаків для гірлянд підвісних ізоляторів. 2. Використання пасивного захисту у вигляді штучних загороджень
5.	Відключення через пошкодження у споживачів	1. Застосування заходів щодо усунення причин пошкоджень стороннього впливу.

Крім того, для успішної експлуатації повітряних ліній діяльність підприємства, що обслуговує дані ЛЕП, повинна бути направлена на підтримку високого рівня надійності мереж в процесі їх використання за призначенням.

Висновки

Проаналізовано частоту та причини аварійних відключень ліній електропередачі напругою 110 кВ в системі електропостачання Сумського регіону. Встановлено, що за досліджуваний період зафіксовано 66 випадків відключень, з яких 15,2 % сталося через невстановлені причини. Виявлено, що більшість причин відключень пов'язана з технічним станом обладнання та впливом природних чинників, що вимагає як удосконалення конструктивних рішень для ЛЕП, так і підвищення якості обслуговування та моніторингу мереж.

Розрахунок інформаційної ентропії аварійних відключень за 2015–2023 рр. показав тенденцію до збільшення невизначеності в процесах виникнення аварійних відключень, що спричинено зростанням зовнішніх впливів, деградацією обладнання та нестабільністю експлуатаційних параметрів мережі.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації графіків технічного обслуговування електротехнічного обладнання систем електропостачання, підвищення оперативності реагування на відмови та розробки науково обґрунтованих рішень для підвищення стійкості електромереж регіону.

Список використаної літератури

1. Кучанський В. В. Заходи запобігання резонансних перенапруг в магістральних електричних мережах. *Електроніка та зв'язок: науково-технічний журнал*. 2016. Том 21, Вип. 4(93). С. 24–27.

2. Pereira T., Acosta J., Santiago J., Tavares M. Overvoltages due to line faults on a HWL transmission line: Corona effect and mitigation techniques. *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 224. P. 109573. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109573

3. Salman H. M., Pasupuleti J., Sabry A. H. Review on Causes of power outages and their occurrence: Mitigation Strategies. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, Issue 20. P. 15001. https://doi.org/10.3390/su152015001

4. Campbell R. J. Weather-related power outages and electric system resiliency. *In The Transformation of Electrical Power: Key Issues; Library of Congress, Congressional Research Service*: Washington, DC, USA, 2013.

5. Kolev V. G., Sulakov S. I. The weather impact on the overhead line losses. *In 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. 2017. pp. 119–123. https://doi.org/10.1109/elma.2017.7955414

6. Yang S.; Zhou W.; Zhu S.; Wang L.; Ye L.; Xia X.; Li H. Failure probability estimation of overhead transmission lines considering the spatial and temporal variation in severe weather. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*. 2018. Vol. 7. P. 131–138. https://doi.org/10.1007/s40565-017-0370-4

7. Wu Y., Chang S. M., Hu Y. Literature Review of power system blackouts. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 141. P. 428–431. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.055

8. Савойський О. Ю., Сіренко В. Ф., Вольвач Т. С., Сіренко Ю. В. Підвищення надійності районних трансформаторних підстанції за рахунок орнітологічного захисту ліній електропередачі. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2024. Вип. 24(2). С. 130-139. https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-11

9. Cerrai D., Koukoula M., Watson P., Anagnostou E. N. Outage prediction models for snow and ice storms. *Sustainable Energy Grids and Networks*. 2019. Vol. 21. P. 100294. https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100294

10. Farzaneh M., Chisholm W. A. Effects of ice and snow on the electrical performance of power network insulators. *In Springer eBooks*. 2008. P. 269–325. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8531-4_7

11. Panossian Nadia, Tarek Elgindy. *Power System Wildfire Risks and Potential Solutions: A Literature Review & Proposed Metric. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory*. 2023. NREL/TP-6A40-80746.

12. Балабух В. О. Зміна екстремальних та небезпечних умов погоди, що впливають на енергетичну галузь України. Перший Всеукраїнський Гідрометеорологічний З'їзд з міжнародною участю. 2017. С. 240–241.

13. Saraiva P. On Shannon entropy and its applications. *Kuwait Journal of Science*. 2023. Vol. 50(3). P. 194–199. https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.05.004

References

1. Kuchanskyy, V. (2016). The events for prevention of resonant overvoltages in main power electrical networks. *Elektronika ta zviazok: naukovo-tekhnichnyi zhurnal*, 21, 4(93), 24–27.

2. Pereira, T., Acosta, J., Santiago, J., Tavares, M. (2023). Overvoltages due to line faults on a HWL transmission line: Corona effect and mitigation techniques. *Electric Power Systems Research*, 224, 109573. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109573

3. Salman, H. M., Pasupuleti, J., Sabry, A. H. (2023). Review on Causes of power outages and their occurrence: Mitigation Strategies. *Sustainability*, 15(20), 15001. https://doi.org/10.3390/su152015001

4. Campbell, R. J. (2023). *Weather-related power outages and electric system resiliency*. In The Transformation of Electrical Power: Key Issues; Library of Congress, Congressional Research Service: Washington, DC, USA.

5. Kolev, V. G., Sulakov, S. I. (2017). The weather impact on the overhead line losses. In *15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 119–123. https://doi.org/10.1109/elma.2017.7955414

6. Yang, S., Zhou, W., Zhu, S., Wang, L., Ye, L., Xia, X., Li, H. (2018). Failure probability estimation of overhead transmission lines considering the spatial and temporal variation in severe weather. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(1), 131–138. https://doi.org/10.1007/s40565-017-0370-4

7. Wu, Y., Chang, S. M., Hu, Y. (2017). Literature Review of power system blackouts. *Energy Procedia*, 141, 428–431. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.055

8. Savoiskyi, O., Sirenko, V., Volvach, T., Sirenko, Yu. (2024). Enhancing the reliability of district transformer substations through ornithological protection of power lines. *Proceedings of Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*, 24(2), 130-139. https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-11

9. Cerrai, D., Koukoula, M., Watson, P., Anagnostou, E. N. (2019). Outage prediction models for snow and ice storms. *Sustainable Energy Grids and Networks*, 21, 100294. https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100294

10. Farzaneh, M., Chisholm, W. A. (2008b). Effects of ice and snow on the electrical performance of power network insulators. In *Springer eBooks* (pp. 269–325). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8531-4_7

11. Panossian, Nadia, and Tarek Elgindy. (2023). *Power System Wildfire Risks and Potential Solutions: A Literature Review & Proposed Metric*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-6A40-80746.

12. Balabukh, V. (2017). Changing extreme and hazardous weather conditions affecting Ukraine's energy sector. *First all-ukrainian hydrometeorological congress with international participation*, 240–241.

13. Saraiva, P. (2023). On Shannon entropy and its applications. *Kuwait Journal of Science*, 50(3), 194–199. https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.05.004

УДК 621.311 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.30

Ю. В. СІРЕНКО
доктор філософії з галузі знань галузеве машинобудування, доцент,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-1818-3653

Т. С. ВОЛЬВАЧ
асистент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-8890-6901

О. Ю. САВОЙСЬКИЙ
кандидат технічних наук,
завідувач кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6459-4931

В. М. КОЗІН
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9821-7774

АНАЛІЗ СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ ТА ЗАХОДИ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ СИТУАЦІЇ

Війна в Україні стала серйозним випробуванням для її енергетичного сектору, спричинивши значні руйнування інфраструктури, зміни структури енергоспоживання та загострення проблем енергетичної безпеки. У роботі проаналізовано поточний стан енергетичного сектору України в умовах війни.

Важливо зазначити, що війна призвела до значного зниження споживання енергії в цілому, що пов'язано зі скороченням промислового виробництва, міграцією населення та загальним економічним спадом. Енергетична інфраструктура отримала значні втрати внаслідок бойових дій. Великі генеруючі потужності зазнали безповоротних руйнувань та пошкоджень. Найбільших втрат зазнали ТЕС та ТЕЦ, які були цілями російських атак через їх важливість для енергопостачання. Атомна енергетика також зазнала значних викликів, зокрема, окупація Запорізької АЕС створила серйозні ризики ядерної безпеки. Окрім того, значних пошкоджень зазнали об'єкти передачі та розподілу електроенергії, зокрема лінії електропередачі та трансформаторні підстанції. Це ускладнило забезпечення стабільного енергопостачання, особливо в прифронтових регіонах. Російські атаки на енергетичну інфраструктуру мають на меті дестабілізацію ситуації в Україні, створення гуманітарної кризи та тиск на український уряд.

Проаналізовано тенденції та виклики для енергетичного сектору України в умовах війни. З огляду на подану інформацію, можна виділити декілька напрямів, в яких можна працювати для поліпшення ситуації в енергетичному секторі України. По-перше, це розвиток відновлюваної енергетики, по-друге, це підвищення енергоефективності складових елементів енергосистеми, по-третє, це модернізація енергетичної інфраструктури, в четверте, сприяння розвитку розподіленої генерації, і останнє, п'яте, це реформування енергетичного сектору. Всі ці напрямки є взаємопов'язаними та потребують комплексного підходу для забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору України.

Ключові слова: *електричні станції, енергетика, відновлювальні джерела енергії, сонячна генерація, вітрові електростанції, електричні мережі, електропостачання, трансформатор, генеруюча потужність.*

YU. V. SIRENKO
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-1818-3653

T. S. VOLVACH
Assistant at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-8890-6901

O. YU. SAVOISKYI
Candidate of Technical Sciences,
Head of the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6459-4931

V. M. KOZIN
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy
and Electrical Engineering Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9821-7774

ANALYSIS OF THE STATE OF UKRAINE'S ENERGY SYSTEM AND MEASURES TO IMPROVE THE SITUATION

The war in Ukraine has become a serious challenge for its energy sector, causing significant infrastructure destruction, changes in energy consumption patterns, and exacerbation of energy security issues. This paper analyzes the current state of Ukraine's energy sector under wartime conditions.

It is important to note that the war has led to a significant decrease in overall energy consumption, which is related to the reduction of industrial production, population migration, and the general economic decline. The energy infrastructure has suffered major losses as a result of military actions. Large generating capacities have been irreversibly destroyed or damaged. The greatest losses were suffered by thermal power plants and combined heat and power plants, which were targeted by Russian attacks due to their importance for energy supply. The nuclear energy sector also faced significant challenges, in particular, the occupation of the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant created serious nuclear safety risks. Additionally, transmission and distribution facilities, including power lines and transformer substations, sustained significant damage. This complicated the provision of stable energy supply, especially in frontline regions. Russian attacks on energy infrastructure aim to destabilize the situation in Ukraine, create a humanitarian crisis, and exert pressure on the Ukrainian government.

The paper analyzes trends and challenges in Ukraine's energy sector during the war. Based on the presented information, several key areas can be identified for improving the situation in the energy sector of Ukraine. Firstly, this includes the development of renewable energy sources. Secondly, increasing the energy efficiency of the components of the energy system. Thirdly, modernization of the energy infrastructure. Fourthly, the promotion of distributed generation. And finally, the reform of the energy sector. All these directions are interconnected and require a comprehensive approach to ensure the sustainable development of Ukraine's energy sector.

Key words: *power plants, energy sector, renewable energy sources, solar generation, wind power plants, electrical grids, electricity supply, transformer, generating capacity.*

Постановка проблеми

Аналіз питання стану виробництва електроенергії спрямований на розробку заходів, що забезпечують надійну та ефективну генерацію, транспортування, передачу та розподіл електричної енергії з виконанням всіх вимог зі збереження та охорони довкілля, підвищення енергетичної ефективності, має значну актуальність та вимагає термінового вирішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

До повномасштабного вторгнення енергетичний баланс України характеризувався диверсифікованою структурою, в якій значну частку займали традиційні види палива, переважно вугілля та торф, що становить 25,2 %. Саме ці види палива, а особливо вугілля, відігравали важливу роль у тепловій енергетиці та промисловості, що свідчить про значну залежність країни від викопних ресурсів. Наступним за обсягом споживання був природний газ, частка якого складала 23,9 %. Цей вид палива використовувався у промисловості, теплоенергетиці та у побутовому секторі, що також вказує на залежність від його поставок. Нафтопродукти – продукти переробки нафти – використовувалися переважно на транспорті та промисловості, їх частка становила 0,7 %. Важливу роль в енергетичному балансі відігравала атомна енергетика, яка забезпечувала значну частину виробництва електроенергії – 22,6 %. Гідроенергетика, представлена великими ГЕС та ГАЕС, була важливим джерелом електроенергії з потенціалом для балансування енергосистеми, її частка складала 11,4 %. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ),

включаючи сонячну, вітрову, гідроенергетику (малі ГЕС), енергію біомаси тощо, на той час займали відносно невелику частку – 5,9 %, що вказує на початковий етап розвитку цього сектора в Україні. Загальна електрична потужність електрогенеруючих об'єктів становила 55 579,2 МВт, у тому числі на АЕС приходилося 13 880 МВт за рахунок роботи 15 енергоблоків. Атомна енергетика забезпечувала значну частину базового навантаження в енергосистемі. ТЕС та ТЕЦ за рахунок використання 112 енергоблоків дозволяли отримувати 30 545 МВт електроенергії. Теплова енергетика відігравала важливу роль у виробництві не лише електричної, але і теплової енергії. ГЕС та ГАЕС в Україні використовують 14 гідроспоруд із загальною потужністю 6646,7 МВт. Гідроенергетика використовувалася для покриття пікових навантажень та балансування енергосистеми. Виробничі потужності сектору ВДЕ складали 4507,5 МВт та він мав потенціал для зростання, але на той час його потужність була відносно незначною.

Структура розподілу генерації електроенергії за типами електростанцій була такою: АЕС – 56,1 %, ТЕС та ТЕЦ – 29,3 %, ГЕС та ГАЕС – 8,7 %, ВДЕ – 5,9 %. При цьому атомна енергетика була основним джерелом генерації електроенергії, а теплова енергетика відігравала важливу роль, у першу чергу, для маневрування потужності під час пікових навантажень на енергосистему. Водночас відновлювані джерела енергії генерували невелику частку електроенергії [2, 4].

Аналіз даних свідчить про те, що до повномасштабного вторгнення енергетичний сектор України характеризувався значною залежністю від викопних видів палива та атомної енергетики. Відновлювані джерела енергії на той час відігравали відносно невелику роль, але мали потенціал для подальшого розвитку [6]. Наведена інформація є важливою для розуміння вихідної ситуації в енергетичному секторі України до початку повномасштабного вторгнення та аналізу змін, які відбулися внаслідок воєнних дій.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є порівняльний аналіз стану енергетики в Україні до моменту повномасштабного вторгнення та під час нього.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єднана енергетична система України – основа електроенергетики країни для забезпечення електроенергією споживачів. Вона поєднує генеруючі потужності, розподільчі мережі по регіонах та лінії електропередачі класами напруги 220–750 кВ. Розподільчі мережі електроенергії мають довжину близько 1 млн. км повітряних і кабельних ліній електропередачі класів напруги 0,4–150 кВ [5].

До складу системи електропостачання (СЕ) України входить дві підсистеми. Перша відповідає за надійність та технічне забезпечення надання споживачам електричної потужності необхідної якості, а друга – за регулювання процесів електроенергетичного комплексу.

Всі складові СЕ пов'язані спільним технологічним процесом за фізичними законами. Виконання цих законів забезпечує роботу системи, та, у першу чергу, за забезпечення відповідно до навантаження в системі генеруючої потужності. Умова стабільності СЕ полягає у збереженні балансу між виробництвом та споживанням електроенергії відповідно до потреб.

Протягом трьох років війни в Україні повністю зруйновані та знаходяться на окупованих територіях близько 45 % генеруючих потужностей енергосистеми [5].

Не відновлювальної шкоди зазнала теплова генерація. Близько 87 % вугільних ТЕЦ, що входили до її складу, наразі вважаються втраченими. На початку повномасштабної війни в Україні працювали 12 ТЕС загальною потужністю 21,5 ГВт. Потужність ТЕЦ нараховувала 6,1 ГВт. У даний час під окупацією знаходиться 22 ГВт теплової генерації, переважно вугільної. Країна була змушена швидко скоротити використання кам'яного вугілля як джерела енергії. [2, 4, 5].

Підземні газосховища можуть вмістити 12 млрд. м^3 природного газу. Однак [3] на потреби опалення побутових приміщень необхідно мати 14,5 млрд. м^3, що компенсується щоденним надходженням до сховищ близько 30 млн. м^3 природного газу. За 2024 рік в Україні було видобуто близько 19 млрд. м^3 природного газу, що перевищило показники попереднього року на 400 млн. м^3 та дозволило впевнено забезпечити всі потреби житлово-комунального сектору [2, 4, 5].

На заміну зруйнованих ТЕЦ були встановлені газо-поршневі установки, які дозволили закрити власні потреби в електроенергії та забезпечити пікові балансування енергосистеми. За підтримки держави розпочато будівництво газо-поршневих електричних станцій загальною потужністю 120 МВт [5].

У результаті бойових дій постраждала відновлювальна та гідрогенерація: зруйновані, пошкоджені або знаходяться в окупації 2,3 МВт потужностей ГЕС та 3,9 ГВт ВЕС та СЕС. До втрат у ВЕС можна віднести 3 вітрогенератори, що розташовані у Донецькій та Запоріжській областях, трансформаторну підстанцію ВЕС у м. Херсон, зруйновані лопаті вітрогенератора біля м. Очаків (Миколаївська область) внаслідок влучання дрону.

Дуже вразливою до обстрілів та ракет є наземна частина СЕС. У Харківській області зруйновані всі наземні частини приватних СЕС загальною потужністю 28,4 МВт та більша частина промислових дахових СЕС загальною потужністю 6,3 МВт із 7,3 МВт. На окупованих територіях втрачено близько 1,2 ГВт СЕС [2, 4, 5].

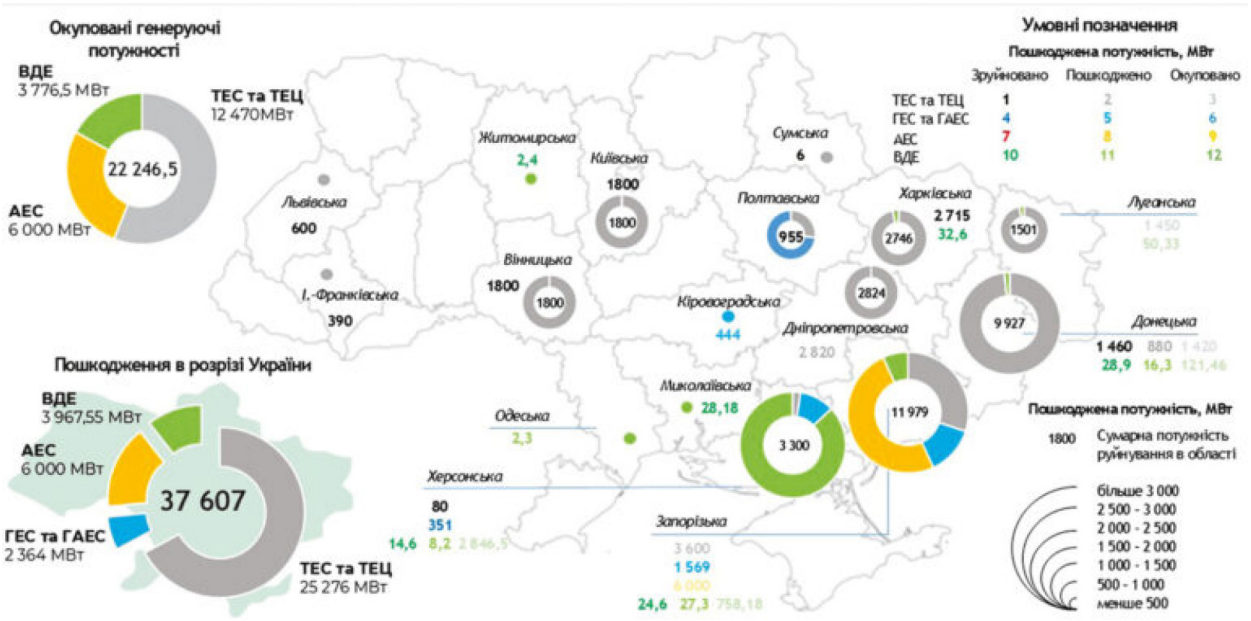


Рис. 1. Карта втрат об'єктів енергосистеми України станом на 25.11.2024 р. [2]

З рис. 1 можна зробити висновок, що максимально зазнали втрат потужностей регіони, що знаходяться безпосередньо близько до зон бойових дій. Значні руйнування об'єктів енергетичного призначення спостерігаються на Поділлі та Прикарпатті.

Енергетична система України налаштована за двома принципами: виробництво електроенергії потужними АЕС протягом доби (переважно вдень) постійного обсягу 7,8 ГВт·год, а зранку і ввечері у пікові години енергетичний баланс забезпечують ТЕС та ГЕС. Транспортування електроенергії забезпечується переважно повітряними лініями окремо з кожної області до мереж загальнодержавного значення НЕК «Укренерго». АЕС не можуть забезпечувати глибокого регулювання потужності, тобто швидко зменшувати виробництво електроенергії вночі під час зменшення її споживання, або навпаки, різко збільшувати генерацію під час пікових годин зранку та ввечері [2, 5].

Із загальної кількості генерації ТЕС загальною потужністю 30,6·ГВт зазнали руйнування станції потужністю 22,6 ГВт. Ті, що залишилися у роботі, потужністю 8 ГВт можуть забезпечувати електроенергією в обсязі 2,4 ГВт·год [2].

Ворожа тактика винищення енергетичних об'єктів була спрямована і на руйнування ГЕС та ГАЕС: із загальної потужності 6,6 ГВт безповоротно зруйновано станції загальною потужністю 0,351 ГВт. Переважно це пов'язано з руйнуванням греблі Каховської ГЕС. ГАЕС здатні акумулювати енергію, перерозподіляючи її виробництво між періодами мінімального та максимального споживання. Вони закачують воду у нічні години, використовуючи наявний у системі надлишок електроенергії, що виникає за рахунок зменшення її споживання, а повертають у пікові ранкові години. Вони є резервом для компенсування браку енергії в енергосистемі. Баланс потужностей гідростанцій забезпечується в обсязі 2,2 ГВт · год при великій кількості води у річках. Упродовж посушливого періоду року генерація знижується до 1,2 ГВт · год [2, 4, 5].

Втрат енергосистема України зазнала і внаслідок пошкодження ВДЕ: із 6,3 ГВт загальної потужності промислових СЕС під контролем ворога наразі знаходяться 3,7 ГВт, що становить близько 60 % від загальної потужності. Крім того, зазнали руйнувань на лінії фронту близько 1 ГВт СЕС. Залишки сонячної енергетики генерують у мережу до 2,2 ГВт·год, а у світлу пору доби взимку здатні виробляти лише 0,5 ГВт·год [2, 4, 5].

Зазнала втрат і вітроенергетика України. Встановлена потужність вітроенергетики становить 1672 МВт, до якої входять 34 ВЕС або 699 вітрових турбін потужністю 3,5 МВт кожна. Потужні ВЕС знаходяться у Запоріжській, Миколаївській, Одеській та Львівській областях із загальною потужністю генерації 2 ГВт. Внаслідок військових дій у даний час не експлуатується переважна частина вітрогенераторів, зупинено близько 70 % (1162,5 МВт). На тимчасово окупованих територіях залишились найбільші ВЕС: 200 МВт – Ботієвська ВЕС, 100 МВт – Орловська ВЕС, 200 МВт – Приморська 1, 2 ВЕС. Під окупацією знаходяться також п'ять ВЕС загальною потужністю 335 МВт компанії ТОВ «Віндкрафт Україна», що складає близько 21 % загальної потужності ВЕС України. Діючі ВЕС, що розташовані у Одеській та Львівській областях, здатні забезпечити тільки 372,5 МВт потужностей. Частково працездатною залишилась Дністровська ВЕС першої та другої черг із загальною потужністю 100 МВт, а також вітряки потужністю 33 МВт ТОВ «Овід Вінд». На початку вторгнення 2022 року було запущено першу чергу Тилігувської ВЕС (Миколаївська область) та Сколівську ВЕС (Львівська область) загальною потужністю

126 МВт. Разом з тим були виведені з ладу 11 вітрогенераторів. Протягом 2024 року було заплановано розширити Тилігувську ВЕС за рахунок будівництва 2 черги з сумарною потужністю 500 МВт. Компанією ТОВ УК «Вітряні парки України» було завершено будівництво першої вітрової турбіни між львівською та закарпатською областями, вітропарк «Островський» потужністю 80 МВт [2, 5].

Загальна кількість руйнувань промислових СЕС і ВЕС складає близько третини від загальної потужності. Було втрачено СЕС у м. Мерефи Харківської області потужністю 1,2 МВт (рис. 2) [2, 5].



Рис. 2. Зруйнована СЕС (м. Мерефа, Харківська область) [2]

Водночас необхідно зазначити, що [7] завдяки бізнесу у такий складний час відбувається створення нових проєктів зеленої генерації на забезпечення власних потреб. Так за 2024 рік було встановлено 200 МВт СЕС на дахах підприємств та логістичних відділень. Наприклад, група компаній «Епіцентр» збудувала СЕС потужністю 12,4 МВт для забезпечення потреб компанії у робочий час. Для розширення проєктів зеленої генерації державні банки України надали кредити на будівництво СЕС потужністю 83 МВт на дахах приватних підприємств для забезпечення їх власних потреб. Сектор відновлювальної енергетики за час повномасштабної війни зріс на 650 МВт потужностей [2, 5, 7].

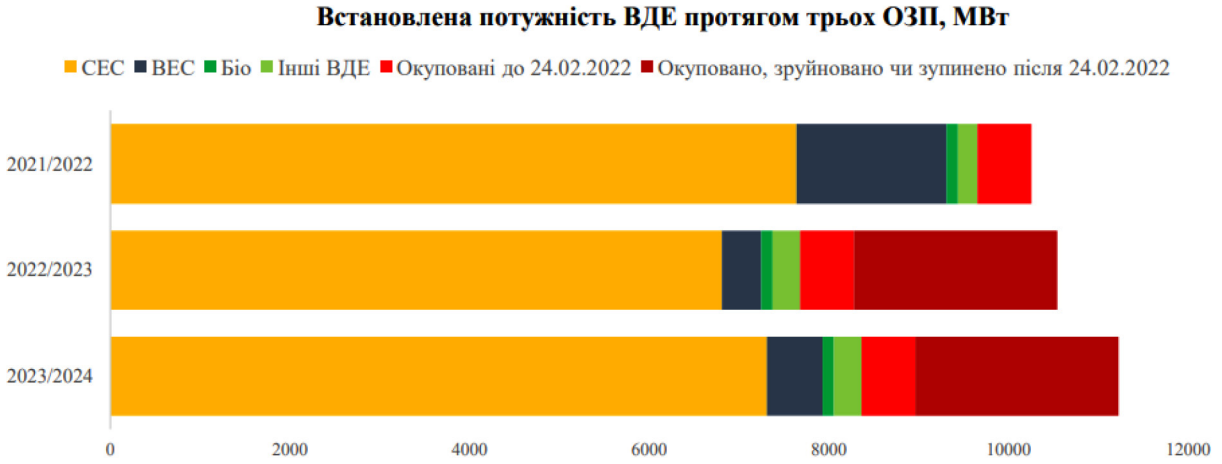


Рис. 3. Нарощування потужності ВДЕ за період 2022–2024 рр. [5]

Постійно зазнають руйнувань складові магістральних електромереж та підстанції. Внаслідок цілеспрямованих атак ворога пошкоджені десятки магістральних ліній мережі, що призвело до глобальних ушкоджень енергосистеми [8]. Складна ситуація у Харківській області, особливо у м. Харків, де ворог неодноразово намагався повністю знищити енергосистему міста [9, 10]. Відновлення електропостачання до міста завжди вимагає значного часу.

Магістральні лінії електропостачання та розподільчі електромережі з'єднані вузловими підстанціями. Система електропостачання нараховує 23 600 км повітряних ліній та 141 підстанцію під експлуатацією оператором системи передачі (ОСП) «Укренерго» класів напруги 110–750 кВ, а також близько 200 тис. трансформаторних підстанцій класів напруги 6–150 кВ. У випадку ушкоджень лінії або підстанції, енергетикам доводиться забезпечувати заміну схеми електропостачання споживачів. Більша частина повітряних ліній зношена та вимагає заміни або реконструкції. Близько 5 % від загальної протяжності повітряних ліній електропередачі повністю відпрацювали свій ресурс. Однак під час виконання планових та аварійних робіт здійснюється постійна модернізація електромережі, встановлюється автоматика [1, 5].

Головне завдання СЕ України – забезпечення балансу електроенергії між виробництвом та споживачами. Відповідно до [11] частота струму змінюється в суворо регламентованих межах і має знаходитися для систем із синхронізацією генераторів у діапазоні 50 Гц ± 1 % протягом 99,5 % часу та 50 Гц +4 / –6 % протягом всього часу. Щойно відбувається пошкодження енергетичної системи, частота змінного струму змінюється і виникає необхідність збільшення активної потужності, яка генерується електростанціями. Якщо в енергосистемі порушується баланс, то трансформатори та електромережі часто перевантажуються, що спричиняє виникнення серйозних аварійних ситуацій. Часто це призводить до спрацювання систем автоматичного захисту, які відключають споживачів та окремі електростанції від загальнодержавної енергосистеми. Вирівнювання її балансу часто забезпечується енергетиками вручну під'єднанням або від'єднанням генеруючих потужностей [5].

Основна частина електроенергії ОЕС України виробляється енергоблоками трьох АЕС з п'яти, а саме Рівненською, Південноукраїнською та Хмельницькою, які мають загальну встановлену потужність 8 ГВт та забезпечують електроенергією базові потреби споживачів і промисловості. Найбільша в Європі та одна з десяти світових атомних станцій – Запорізька АЕС, яка має 6 ГВт встановленої потужності, що складає близько 43 % від загальної потужності всіх АЕС України, у даний час знаходиться на тимчасово окупованій території. Роботу цієї станції повністю забезпечують повітряні лінії НЕК «Укренерго». Постійно знаходячись під масовими обстрілами, у даний час на повну потужність працюють лише два енергоблоки Запоріжської АЕС з дев'яти, інші сім завантажені лише на 40 % [2, 5].

Сумарна потужність, яку генерує ОЕС України становить 12·ГВт·год електричної енергії. Споживачі використовують у пікові години 14·ГВт·год електричної енергії влітку та 18·ГВт·год взимку при температурі повітря не вище –5 °С. У зв'язку з цим виникає брак електроенергії взимку у кількості до 6·ГВт·год та влітку під час проведення на АЕС планових робіт. Наявний дефіцит електроенергії у кількості 2,1·ГВт·год у години пік теоретично можуть покривати енергосистем сусідніх країн. Однак такий захід не покриває повністю брак енергії у системі. У даний час нестача потужності генерації електроенергії у країні складає близько 4 ГВт за умови, що не відбувається додаткове руйнування об'єктів генерації, передачі та розподілу внаслідок військових дій. Значною проблемою щодо покриття дисбалансу за рахунок імпорту електроенергії зі Словаччини та Румунії стало пошкодження електростанції Мукачево-500, що спричинило суттєве обмеження потужності до 0,3 ГВт·год [2, 4, 5].

Попри складну ситуацію на території України у 2024 році оператори системи розподілу часто знаходячись під обстрілами здійснили заміну 14 тис. км ліній електропередачі, виконали ремонт 29 тис. км трас повітряних ліній та більше 6 тис. енергетичних об'єктів, розчистили більше 47 тис. км трас повітряних ліній, замінили близько 65 км ліній грозозахисту, а також відремонтували значну кількість трансформаторних підстанцій та іншого електрообладнання [2, 5].

Внаслідок повномасштабного вторгнення відбулися значні зміни в енергетичному секторі України. Спостерігається зростання частки ВДЕ у загальній структурі об'єктів генерації, що є позитивною тенденцією. Водночас, відбулося зменшення використання частки викопного палива (вугілля та торфу), що може бути пов'язано із руйнуванням вугільних ТЕС, економічними чинниками або екологічною політикою країни. Відзначається зростання частки природного газу та атомної енергії, що може бути тимчасовим явищем, пов'язаним з необхідністю заміни втрачених потужностей та забезпеченням енергетичної безпеки. Зафіксовано значне зменшення загальних електрогенеруючих потужностей, що є прямим наслідком руйнувань, окупації та пошкоджень енергетичної інфраструктури. Зміни у структурі потужностей також впливають на співвідношення потужностей різних типів електростанцій.

Вплив на країну є значним. Втрати енергетичних потужностей та зміни у структурі енергогенерації мають прямий вплив на енергетичну безпеку країни, роблячи Україну більш вразливою до енергетичних криз та залежною від зовнішніх джерел енергії. Енергетична криза негативно впливає на економіку країни, спричиняючи зростання цін на енергоносії, перебої в енергопостачанні та зниження конкурентоздатності підприємств. Зростання

частки ВДЕ є позитивною тенденцією з точки зору екології, оскільки сприяє зменшенню викидів парникових газів та забруднення довкілля.

Україна має потенціал для розвитку відновлюваної енергетики та переходу до більш стійкої енергетичної системи. Відновлення та модернізація енергетичної інфраструктури потребують значних інвестицій та міжнародної підтримки. Важливою є диверсифікація джерел енергії та підвищення енергоефективності.

Загалом, порівнюючи дані, ми бачимо значні зміни в енергетичному секторі України, спричинені війною. Ці зміни мають серйозні наслідки для енергетичної безпеки, економіки та екології країни. Однак, Україна має потенціал для подолання цих викликів та побудови більш стійкої та сучасної енергетичної системи.

Загальна пошкоджена потужність енергосистеми України у даний час досягає 37 607 МВт, що свідчить про значні втрати в енергетичному секторі. У сегменті генерації на основі ВДЕ (СЕС, ВЕС та інші об'єкти відновлюваної енергетики) пошкодження становлять 3967,55 МВт. Пошкодження у сегменті АЕС становлять близько 6000 МВт. Це викликає особливе занепокоєння через ризики, пов'язані з ядерною безпекою. У сегменті генерації на базі ГЕС та ГАЕС пошкодження становлять 2364 МВт, що впливає на регулювання частоти та балансування енергосистеми. Пошкодження на ТЕС і ТЕЦ становлять 25 276 МВт. Це найбільша категорія втрат, що серйозно впливає на виробництво електроенергії та теплопостачання [2, 5].

У деяких областях сумарна потужність зруйнованих енергетичних об'єктів перевищує 3 ГВт, що свідчить про критичну ситуацію у цих регіонах. Значні пошкодження зафіксовано у Харківській, Луганській, Донецькій, Запорізькій та Київській областях. Ці регіони зазнали найбільшого впливу бойових дій. В інших областях, таких як Львівська, Івано-Франківська та Вінницька, пошкодження менші, однак значні та потребують уваги [5].

Подана інформація показує масштабні руйнування в енергетичній системі України, спричинені бойовими діями. Відновлення енергетичної інфраструктури є пріоритетним завданням, що потребує значних інвестицій та зусиль. Необхідно враховувати регіональні особливості та пріоритети під час планування відновлювальних робіт. Важливо забезпечити не лише відновлення, але й модернізацію енергетичної системи для підвищення її стійкості та енергоефективності.

У результаті проведеного аналізу стану енергетики в Україні протягом перших трьох років військового стану можна запропонувати такі заходи з покращення енергетики:

– здійснити модернізацію систем постачання та розподілу для уникнення втрат електроенергії застарілими системами;

– протягом найближчих двох років встановити газо-поршневі установки загальною встановленою потужністю не менше 2,7 ГВт, що дозволить ефективно покривати дефіцит під час пікових годин навантаження;

– здійснити деокупацію Запорізькою АЕС та відновити її роботу у повному обсязі, що дозволить не лише підвищити ядерну безпеку країни, але й забезпечити збільшення загального виробництва електроенергії для потреб промисловості;

– продовжити добудову, у тому числі із залученням зовнішніх інвестицій, чотирьох енергоблоків Хмельницької АЕС;

– сприяти залученню закордонних інвесторів до відновлення та розбудови енергетичної системи України у післявоєнний період;

– забезпечити збільшення можливостей імпорту електроенергії з сусідніх країн для балансування енергетичної системи у час пік доти, поки буде відбуватися відновлення енергетики;

– сприяти розвитку існуючих та створенню нових об'єктів ВДЕ: ВЕС потужністю до 800 МВт, СЕС та інших типів установок, що дасть можливість розвантажити енергосистему в цілому до 1 ГВт та полегшить її балансування під час пікових навантажень;

– розглянути можливість створення по всій території країни потужних центрів акумуляції електроенергії, що дозволять більш рівномірно диверсифікувати її потоки між споживачами, у тому числі з метою перерозподілу споживання між сусідніми країнами та впродовж доби або періоду року. Цей захід сприятиме суттєвому збільшенню частки СЕС, однак вимагатиме застосування високоефективної, наприклад, літій-залізо-фосфатної технології акумуляції енергії.

Висновки

У результаті проведеного аналізу встановлено, що енергетична система України зазнала масштабних руйнувань через повномасштабну війну, зокрема втрачено більшість теплової генерації та значну частку відновлюваних джерел енергії. Незважаючи на це, спостерігається позитивна тенденція до зменшення залежності від викопного палива та зростання ролі атомної і відновлюваної енергетики. Атомна енергетика залишається основним джерелом стабільної генерації, однак окупація Запорізької АЕС створює значні ризики для національної безпеки. Поряд із цим, розвиток сонячної та вітрової енергетики, особливо в приватному секторі, демонструє високий потенціал зеленої трансформації.

Водночас серйозною проблемою є зношеність розподільчих мереж та уразливість інфраструктури, що ускладнює балансування системи. Україна має потенціал до формування стійкої, енергоефективної енергетики, однак

для цього необхідні значні інвестиції, міжнародна підтримка, модернізація мереж та розбудова систем накопичення енергії.

Комплексна реалізація запропонованих заходів стане запорукою енергетичної безпеки країни у післявоєнний період.

Список використаної літератури

1. ПРОХОДЖЕННЯ ОСІННЬОЗИМОВИХ ПЕРІОДІВ 2022–2024 РР. СТАН ЕНЕРГОСИСТЕМИ / ГО «ДІКСІ ГРУП». – : ГО «ДІКСІ ГРУП», 2024. С. 22.

2. Ігнатьєв С. Енергетична система України: стан на кінець 2024 року та сценарії на 2025. нафта&газ України. Статті. URL: https://oil-gas.com.ua/statti/enerhetychna_systema_ukrainy_stan_na_kinets_2024_roku_ta_stsenarii_na_2025 (дата звернення: 23.03.2025).

3. Ткачук М. Енергетична незалежність України: реалії та перспективи зимового сезону. Ua.news. Статті. 24.12.2024. URL: https://Https://ua.news/ua/ukraine/energetychna-nezalezhnist-ukrayiny-realiyi-ta-perspektyvy-zymovogo-sezonu (дата звернення: 23.03.2025).

4. Обленерго у 2024 році відремонтували понад 29 тис. Км електромереж. Українська енрегетика. навігатор у світі даних про енергоринки. 29.01.2025. URL: https://ua-energy.org/uk/posts/oblenerho-u-2024-rotsi-vidremontuvaly-ponad-29-tys-km-elektromerezh (дата звернення: 23.03.2025).

5. Цілісність енергосистеми і стабільність енергопостачання – наслідок безперервної роботи тисяч енергетиків. Міністерство енергетики України. Новини. 14.03.2025. URL: https://www.mev.gov.ua/novyna/tsilisnist-enerhosystemy-i-stabilnist-enerhopostachannya-naslidok-bezperervnoyi-roboty (дата звернення: 23.03.2025).

6. Електроенергетика України: стан і перспективи. YC.Market. 26.01.2025. URL: https://blog.youcontrol.market/ieliektroienierghietika-ukrayini-stan-i-pierspiektivi/ (дата звернення: 23.03.2025).

7. Губарєва В. Перспектива відновлювальних джерел енергії під час війни: Як за рахунок зеленої генерації Україна планує забезпечити собі енергонезалежність? Ukraine War Environmental Consequences Working Group. Зелене відновлення. 26.12.2024. URL: https://uwecworkgroup.info/uk/prospect-for-renewable-energy-in-wartime-how-ukraine-plans-to-ensure-energy-independence-using-green-generation/ (дата звернення: 23.03.2025).

8. Бондарчук І. Тренди енергетичної галузі та прогноз на 2025 рік. LCF. 20.01.2025. URL: https://lcf.ua/thought-leadership/energy-and-natural-resources/trendi-energetichnoyi-galuzi-ta-prognoz-na-2025-rik/ (дата звернення: 25.03.2025).

9. КорфЄ. 3 роки війни: Стан енергетики України та її перспективи. Copyright. 18.03.2025. URL: https://e-b.com.ua/3-roki-viini-stan-energetiki-ukrayini-ta-yiyi-perspektivi-7614 (дата звернення: 25.03.2025).

10. Омельченко В. Енергетика України: 2024-2025 років у тумані невизначеності. Banker. 05.12.2024. URL: https://banker.ua/uk/projects/energetika-ukraini-2024-2025-rokiv/ (дата звернення: 25.03.2025).

11. ДСТУ EN 50160-2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). [Чинний від 08.12.2023]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. – 32 с.

References

1. PROKhODZhENNIa OSINNOZYMOVYKh PERIODIV 2022–2024 RR. STAN ENERHOSYSTEMY (2024) [Passage of the autumn-winter periods 2022–2024. State of the energy system.] Civic Organization “DIXI GROUP”. https://dixigroup.org/wp-content/uploads/2024/04/2024_winterseasons_analysis_dixi_group_final.pdf [in Ukrainian]

2. Ihnatiev, S. (2024, 23 December). *Ukraine’s energy system: status at the end of 2024 and scenarios for 2025*. BANKER. Expert Column. https://oil-gas.com.ua/statti/enerhetychna_systema_ukrainy_stan_na_kinets_2024_roku_ta_stsenarii_na_2025

3. Tkachuk, M. (2024, 24 December). *Ukraine’s energy independence: realities and prospects of the winter season*. Ua.news. https://ua.news/ua/ukraine/energetychna-nezalezhnist-ukrayiny-realiyi-ta-perspektyvy-zymovogo-sezonu

4. Ukrainian Energy. (2025, 29 January). *Oblenergo repaired over 29 thousand km of power grids in 2024*. https://ua-energy.org/uk/posts/oblenerho-u-2024-rotsi-vidremontuvaly-ponad-29-tys-km-elektromerezh

5. Ministry of Energy of Ukraine. (2025, 14 March). *Integrity of the energy system and stability of power supply – the result of the uninterrupted work of thousands of energy workers*. https://www.mev.gov.ua/novyna/tsilisnist-enerhosystemy-i-stabilnist-enerhopostachannya-naslidok-bezperervnoyi-roboty

6. YC.Market. (2025, 26 January). *Electric power industry of Ukraine: state and prospects*. https://blog.youcontrol.market/ieliektroienierghietika-ukrayini-stan-i-pierspiektivi/

7. Hubarieva, V. (2024, 26 December). *Prospects for renewable energy in wartime: how Ukraine plans to ensure energy independence through green generation*. Ukraine War Environmental Consequences Working Group. https://uwecworkgroup.info/uk/prospect-for-renewable-energy-in-wartime-how-ukraine-plans-to-ensure-energy-independence-using-green-generation/

8. Bondarchuk, I. (2025, 20 January). *Energy sector trends and forecast for 2025*. LCF. https://lcf.ua/thought-leadership/energy-and-natural-resources/trendi-energetichnoyi-galuzi-ta-prognoz-na-2025-rik/

9. Korf, Ye. (2025, 18 March). *Three years of war: the state of Ukraine's energy sector and its prospects*. Copyright. https://e-b.com.ua/3-roki-viini-stan-energetiki-ukrayini-ta-yiyi-perspektivi-7614

10. Omelchenko, V. (2024, 05 December). *Ukraine's energy sector in 2024–2025 in the fog of uncertainty*. BANKER. https://banker.ua/uk/projects/energetika-ukraini-2024-2025-rokiv/

11. Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrychnykh merezhakh zahalnoi pryznachenosti (2023) [.Voltage characteristics in public electricity supply networks] DSTU EN 50160:2023 (EN 50160:2022, IDT) Natsionalnyi standart Ukrainy. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy [in Ukrainian].

УДК 621.35 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.31

Ю. Є. СКНАР
доктор хімічних наук, професор,
завідувач кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
ORCID: 0000-0002-1188-3684

І. В. СКНАР
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
ORCID: 0000-0001-8433-1285

Р. С. АМІРУЛЛОЄВ
аспірант кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
ORCID: 0009-0002-1571-0817

Т. Є. БУТИРІНА
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри технології неорганічних речовин і екології
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
ORCID: 0000-0002-0619-6783

Д. О. КОЖУРА
студент кафедри технології неорганічних речовин і екології
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
ORCID: 0009-0008-0486-6342

СИНТЕЗ КОМПОЗИТНИХ ФОТОКАТАЛІТИЧНИХ ПЛІВОК Cu-TiO_2

Електроосадження композиційних покривів на основі міді розглядається як перспективний напрям створення сучасних поліфункціональних матеріалів. Однією з ключових сфер їх використання є системи очищення газових викидів і стічних вод. Органічні забруднювачі, характерні для текстильної, харчової та лакофарбової промисловості, ефективно піддаються фотодеструкції за участю каталізаторів. Найчастіше в ролі фотокаталізаторів застосовують напівпровідникові оксидні матеріали, зокрема діоксид титану. Найбільш перспективною сферою застосування композитів, що містять TiO_2*, є фотокаталітична деструкція забруднюючих речовин. Титан діоксид добре відомий як напівпровідник n-типу з відносно високою швидкістю рекомбінації фотоіндукованих носіїв заряду. Властивості титан діоксиду є функцією кристалічної структури, розміру і морфології наночастинок. Особливості конструкції обладнання для очищення стоків вимагають закріплення частинок* TiO_2 *у жорсткій матриці. Оптимальним рішенням є нанесення композитних плівок методом електроосадження, наприклад,* Cu–TiO_2*. Вирішальну роль у формуванні властивостей композитів і виборі технологічних параметрів процесу відіграє склад розчину. Для одержання композитів* Cu–TiO_2 *в роботі використано метансульфонатний розчин, який характеризується високою розчинністю солей і електрохімічною індиферентністю. З'ясовано, що фотокаталітичні властивості композиційних плівок* Cu–TiO_2*, одержаних із метансульфонатного розчину, залежать від кількості включеного в плівки діоксиду титану. Показано, що зростання вмісту* TiO_2 *в плівках з 0,1 до 1,3 мас.% супроводжується підвищенням ефективності фотодеструкції барвника з 6 до 15,5 %. Запропонований склад розчину демонструє високу ефективність для синтезу композиційних плівок фотокаталізаторів, призначених для очищення стічних вод від органічних забруднень.*

Ключові слова: *метансульфонатний розчин, композиційні покриви, діоксид титану, мідь, фотокаталіз, структура, фотодеструкція, електроосадження.*

YU. E. SKNAR
Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Head of the Department of Processes, Apparatuses
and General Chemical Technology
Ukrainian State University of Science and Technology,
SEI "Ukrainian State University of Chemical Technology"
ORCID: 0000-0002-1188-3684

I. V. SKNAR
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Processes, Apparatuses
and General Chemical Technology
Ukrainian State University of Science and Technology,
SEI "Ukrainian State University of Chemical Technology"
ORCID: 0000-0001-8433-1285

R. S. AMIRULLOEV
Postgraduate Student at the Department of Processes, Apparatuses
and General Chemical Technology
Ukrainian State University of Science and Technology,
SEI "Ukrainian State University of Chemical Technology"
ORCID: 0009-0002-1571-0817

T. E. BUTYRINA
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technology
of Inorganic Substances and Ecology
Ukrainian State University of Science and Technology,
SEI "Ukrainian State University of Chemical Technology"
ORCID: 0000-0002-0619-6783

D. O. KOZHURA
Student at the Department of Technology
of Inorganic Substances and Ecology
Ukrainian State University of Science and Technology,
SEI "Ukrainian State University of Chemical Technology"
ORCID: 0009-0008-0486-6342

SYNTHESIS OF CU-TIO$_2$ COMPOSITE PHOTOCATALYTIC FILMS

Electrodeposition of composite coatings based on copper is considered a promising direction for the creation of modern multifunctional materials. One of the key areas of their use is the purification systems of gas emissions and wastewater. Organic pollutants, typical for the textile, food and paint industries, are effectively photodestructed with the participation of catalysts. Most often, semiconductor oxide materials, in particular titanium dioxide, are used as photocatalysts. The most promising area of application of composites containing TiO_2 *is the photocatalytic destruction of pollutants. Titanium dioxide is well known as an n-type semiconductor with a relatively high recombination rate of photoinduced charge carriers. The properties of titanium dioxide are a function of the crystal structure, size and morphology of nanoparticles. The design features of wastewater treatment equipment require the fixation of* TiO_2 *particles in a rigid matrix. The optimal solution is the application of composite films by electrodeposition, for example,* Cu–TiO_2. *The composition of the solution plays a decisive role in the formation of the properties of composites and the selection of technological parameters of the process. To obtain* Cu–TiO_2 *composites, a methanesulfonate solution was used in the work, which is characterized by high solubility of salts and electrochemical indifference. It was found that the photocatalytic properties of* Cu–TiO_2 *composite films obtained from a methanesulfonate solution depend on the amount of titanium dioxide included in the films. It was shown that an increase in the* TiO_2 *content in the films from 0.1 to 1.3 wt.% is accompanied by an increase in the efficiency of photodestruction of the dye from 6 to 15.5 %. The proposed solution composition demonstrates high efficiency for the synthesis of composite films of photocatalysts intended for the purification of wastewater from organic pollutants.*

Key words: *methanesulfonate solution, composite coatings, titanium dioxide, copper, photocatalysis, structure, photodestruction, electrodeposition.*

Постановка проблеми

Важливим аспектом в збереженні довкілля є максимально повне знешкодження промислових викидів. Кількісний і якісний склад виробничих стічних вод досить різноманітний і залежить від галузі промисловості та її технологічних процесів. До забруднювачів водойм органічними речовинами слід віднести виробництва шкіряної і целюлозно-паперової промисловості. Також, відходи органічного походження продукують виробництва барвників та пігментів, цукрові та пивоварні заводи, підприємства м'ясо-молочної, консервної і кондитерської промисловості тощо. Очищення стічних вод від органічних забруднювачів базується на методах їх деструкції. Зокрема, це окиснення, яке дозволяє отримати воду з дуже низьким рівнем забруднення. Також, поширеним методом знешкодження органічних забруднювачів є обробка стічних вод ультрафіолетовим випромінюванням, яка зазвичай потребує використання каталізатору. Для очищення води та повітря від органічних забруднень, а також для знищення бактерій використовують оксиди металів, такі як TiO_2, SnO_2, Fe_2O_3 тощо. Титан діоксид характеризується високою фото чутливістю. З огляду на те, що TiO_2 є хімічно та біологічно інертним і має низьку вартість, він розглядається як найбільш перспективний фотокаталізатор. Обробка стічних вод ультрафіолетом за присутності TiO_2 позиціанується в якості однієї з кращих дезінфекційних технологій, оскільки, на відміну від інших дезінфекційних технологій, при цьому не утворюються канцерогенні або мутагенні сполуки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перспективним напрямком розробки фотокаталізаторів є отримання композиційних покривів з інкорпорованими в металічну матрицю фотокаталітично-активних частинок [1, 2]. Композити Cu–TiO_2 можна наносити на поверхню носія заданої форми, який забезпечує контакт із забруднювачем.

Слід зазначити, що важливим аспектом при отриманні композиційних покривів є вибір розчину осадження. Роботи останніх років в області метансульфонатних технологій показують гарні результати застосування нового типу розчину на основі метансульфонової кислоти [3–6].

Отже, актуальними є визначення впливу складу метансульфонатного розчину та умов електролізу на склад, структуру, фотокаталітичні, та фізико-хімічні властивості покривів композитом Cu-TiO_2.

Найбільш перспективною сферою застосування композитів, що містять TiO_2, є фотокаталітична деструкція забруднюючих речовин [7, 8]. Титан діоксид добре відомий як напівпровідник n-типу з відносно високою швидкістю рекомбінації фотоіндукованих носіїв заряду [9]. Наприклад, такі фотокаталізатори покращують деградацію метиленового синього під дією ультрафіолетового опромінення (УФ).

Властивості титан діоксиду є функцією кристалічної структури, розміру і морфології наночастинок, отже, сильно залежать від методів синтезу [10]. Титан діоксид існує в трьох основних модифікаціях: анатаз, брукіт та рутил. Рутил є стабільною фазою в якості сипучого матеріалу. Однак, способи отримання фази титан діоксиду в розчині сприяють утворенню структури анатазу [11]. В роботах [12–15] показано, що при дуже малих розмірах частинок поверхнева енергія анатазу нижче, ніж рутилу і брукіту.

Для частинок однакового розміру 11 нм термодинамічно стабільним являється анатаз, брукіт стабільний при розмірі частинок від 11 до 35 нм, рутил – більше 35 нм [14].

Титан діоксид широко використовується в якості фотокаталізатору при очищенні стічних вод, які містять синтетичні та органічні барвники текстильної, косметичної, харчової та інших промисловостей [16]. Фотокаталізатори, переважно, складаються з кристалів анатазу [10]. Застосування фотокаталізаторів дає можливість не тільки знебарвлювати барвники, а й провести їх деструкцію [17]. Якщо об'єктом фотоокиснення є органічні сполуки, кінцевими продуктами є, в основному, CO_2, вода та малі полярні молекули.

Схема процесів, що перебігають при фотокаталізі на поверхні TiO_2 представлено на рис. 1 [18]. Ультрафіолетове (УФ) опромінення індукує утворення електронно-діркових пар. Носії заряду реагують з хімічними речовинами,

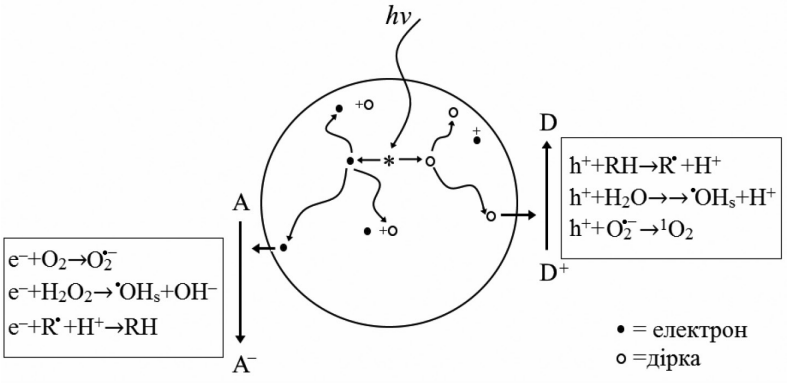


Рис. 1. Процеси, що відбуваються на поверхні TiO_2 у водному середовищі при ультрафіолетовому опроміненні

наприклад, такими як молекули води з утворенням гідроксильних радикалів (OH^-) і пероксидних аніон-радикалів ($O_2^{\bullet-}$), які беруть участь в розкладанні органічних молекул на поверхні TiO_2 [19, 20].

В [7] описується процес фотодеградації барвника родаміну В (RhB). При УФ опроміненні частинки титан діоксиду поглинають фотон, який переводить електрон з валентної зони в зону провідності, при цьому виникає електронна вакансія або (h+) в валентній зоні. Дірки мігрують до поверхні титану, де вони реагують з гідроксильними групами або водою в гратці титан діоксиду з утворенням гідроксильних радикалів:

$$m\text{-}TiO_2 + h\nu \rightarrow h^+ + e^- \quad (1)$$

$$h^+ + m\text{-}TiO_2 \rightarrow m\text{-}TiO_2 + {}^\bullet OH \quad (2)$$

$${}^\bullet OH + RhB \rightarrow \text{продукти} \quad (3)$$

Гідроксильні радикали реагують з родаміном В, утворюючи проміжні продукти, карбон діоксид, воду та неорганічні іони. В [21] для оцінки фотокаталітичної активності покривів був використаний водний розчин метилового оранжевого.

На сьогодні поширеними способами отримання функціональних покривів є хімічний та електрохімічний способи. Серед переваг хімічного нанесення покривів можна зазначити рівномірність їх осадження по всій поверхні, що є вагомою перевагою. Покриви, осаджені даним методом характеризуються низькою пористістю і володіють високою захисною здатністю. Однак, розчини для хімічного нанесення покривів мають високу вартість та короткий термін зберігання, а процес потребує використання високих температур.

Процеси електрохімічного осадження металів з розчинів, як правило, протікають зі значно більш високими швидкостями, ніж процеси хімічного осадження, що є їх перевагою. Крім того, електрохімічне осадження покривів являє собою легко керований і технічно надійний метод для отримання матеріалу з бажаними властивостями [22]. Проте, їх застосування обмежене при осадженні на вироби складної геометричної форми через малу розсіювальну здатність.

Створення композиційних електрохімічних покривів (КЕП) є одним з найважливіших напрямків сучасної гальванотехніки. Композити складаються з металевої матриці та частинок дисперсної фази різних розмірів (нанорозмірні – до 100 нм, частинки мікронного розміру – більше 100 нм).

Для одержання КЕП використовують такі матеріали дисперсної фази: оксиди (TiO_2, SiO_2, Al_2O_3, CeO_2, ZrO_2, SnO_2, Cr_2O_3 і La_2O_3) [23)], карбіди (WC, TiC і SiC) [24,25]), нітриди (Si_3N_4 і BN), вуглецево [26, 27] та алмазовмісні матеріали. Фізико-хімічні властивості композитів відрізняються від властивостей покривів із індивідуального металу [28]. Наявність дисперсних частинок в покривах призводить до покращення фізико-хімічних та захисних властивостей (підвищується твердість, зносостійкість, корозійна стійкість) та появи зовсім нових властивостей (антифрикційних, магнітних, каталітичних).

Властивості одержаних КЕП залежать від параметрів електролізу (густина струму, температура, pH, наявність перемішування), складу електроліту (концентрації, наявність поверхнево-активних речовин і добавок), характеристики дисперсних частинок в розчині (тип, форма, розміри та концентрація) та їх розподілу всередині композиту [29]. За останній час було розроблено ряд нових рішень, перш за все в області властивостей покривів, що дозволяють значно розширити діапазон застосування покривів, що містять наночастинки.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є встановлення закономірностей формування покривів композитом Cu–TiO_2, визначення впливу концентрації титан діоксиду на фотокаталітичні властивості покривів Cu–TiO_2.

Для досягнення мети було сформульовано наступні задачі:

– дослідити вплив складу розчину та режимів електролізу на вміст титан діоксиду в композиційних покривах Cu-TiO_2, одержаних із метансульфонатних розчинів;

– дослідити вплив умов електролізу на фотокаталітичні властивості композиційних покривів Cu–TiO_2, одержаних із метансульфонатних розчинів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Електроосадження гальванопокривів Cu–TiO_2 проводили із метансульфонатного розчину суспензійного типу на мідну фольгу розміром 3 × 2 $см^2$ при температурі 293К. Для одержання покривів Cu–TiO_2 використовували порошок титан діоксиду Р 25 (Degussa), що представляє собою суміш анатазу і рутилу (80:20) із середнім діаметром частинок 30 нм.

Електроосадження композиту Cu-TiO_2 проводили в усталених гідродинамічних умовах. Процес супроводжувався перемішуванням розчину з використанням магнітної мішалки (рис. 2). Підготовка мідної фольги перед нанесенням композитного покриву полягала в знежиренні поверхні зразка содою, промивці дистильованою водою, активуванні протягом однієї хвилини в кислотному розчині, промивці дистильованою водою та сушінні.

Вміст іонів купруму(II) в метансульфонатному розчині визначали за допомогою об'ємного трилонометричного методу. Основою методу є комплексонометричне титрування досліджуваного розчину 0,1 н розчином Трилону Б за присутності аміачного буферу та індикатору мурексиду.

Таблиця 1

Склад розчинів для електроосадження композиційних покривів Cu-TiO_2

Компоненти розчину	Концентрація компонентів розчину, моль/л
$Cu(CH_3SO_3)_2$	0,6
CH_3SO_3H	0,6
TiO_2, г/л	0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0

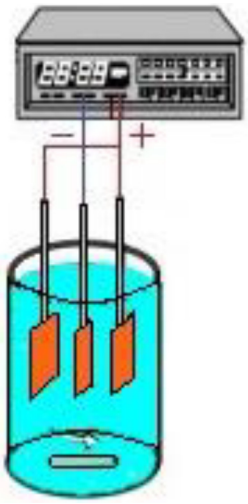


Рис. 2. Схема установки для електроосадження композиту Cu-TiO_2

Вміст титан діоксиду в композиційному покриві Cu-TiO_2 розраховували по різниці мас композиту та міді. Масу міді розраховували за аналітичною концентрацією іонів купруму(II) в кислотному розчині після розчинення в ньому композиційного покриву.

Мікрофотографії покривів Cu-TiO_2 одержували за допомогою багатофункціонального цифрового мікроскопу Supereyes B008 (рис. 3).



Рис. 3. Зображення мікроскопу Supereyes B008

Портативний цифровий USB мікроскоп Supereyes B008, являє собою компактний електронно-оптичний пристрій у формі олівця. Він володіє наступними технічними характеристиками – сенсором 5 Мп і максимальним збільшенням ×500.

Структуру гальванопокривів вивчали методом рентгенівської дифракції за допомогою дифрактометра ДРОН-3 в монохроматизованому CuKα-випромінюванні.

Фотокаталітичну активність Cu-TiO_2 оцінювали за результатами досліджень кінетики фотодеструкції метилового оранжевого під дією ультрафіолетового випромінювання. Композиційні покриви поміщали в розчин метилового оранжевого і піддавали опроміненню ультрафіолетом. В якості джерела випромінювання використовували лампу EXO TERRA Repti Glo10. Діапазон опромінення лампи становив 280–315 нм. Вихідна концентрація метилового оранжевого – 6 мкмоль/л.

Зміну концентрації барвника визначали за зміною оптичної густини розчину фотоколориметричним методом з використанням КФК-2-УХЛ 4.2 та світлофільтру, що відповідає довжині хвилі 490 нм.

Залежність оптичної густини розчину метилового оранжевого від концентрації в досліджуваному діапазоні концентрацій барвника носить лінійний характер. Тобто концентрація барвника прямо пропорційна значенням оптичної густини відповідно до рівняння Бугера-Ламберта-Бера.

Електроосадження композитів Cu-TiO_2 проводили із розчину, що містив 0,5М $Cu(CH_3SO_3)_2$ та 0,5М CH_3SO_3H із додаванням порошку титан діоксиду. Електроліз проводили при перемішування. Перемішування досліджуваних суспензійних розчинів забезпечувало рівномірний розподіл дисперсної фази у всьому об'ємі без утворення осаду на дні стакану.

Дослідження впливу параметрів електролізу на склад покривів Cu–TiO_2 показало, що збільшення концентрації титан діоксиду в розчині призводить до підвищення вмісту дисперсної фази в осадах (рис. 4).

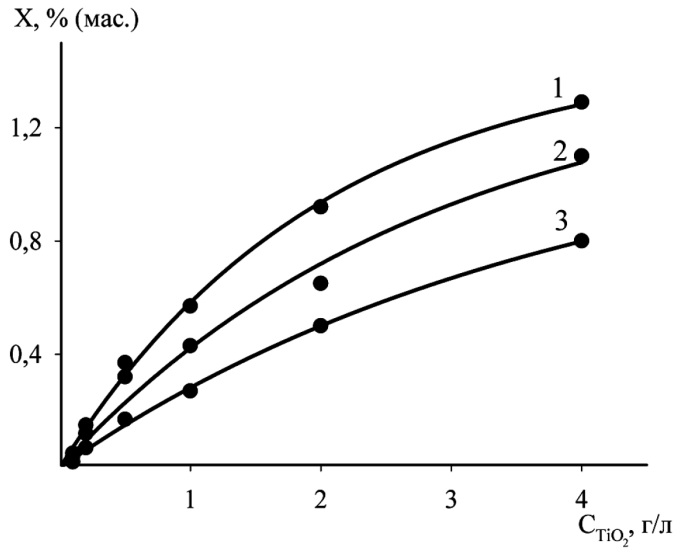


Рис. 4. Залежність вмісту титан діоксиду в композитах Cu–TiO_2 в залежності від концентрації дисперсної фази в розчині і густини струму електроосадження, А/дм^2: 1 – 2; 2 – 5; 3 – 7

Залежність кількості титан діоксиду в композитах від концентрації частинок в розчині нелінійна. Суттєве зростання вмісту дисперсної фази в осадах спостерігається при початковому додаванні до розчину міднення порошку титан діоксиду. При подальшому зростанні концентрації дисперсної фази в суспензії підвищення вмісту TiO_2 в композитах відбувається більш повільно.

Збільшення густини струму осадження композитів призводить до деякого зниження вмісту TiO_2 в осадах.

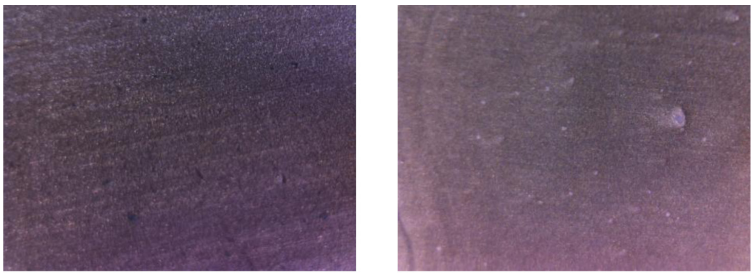
Дослідження морфології поверхні мідних композиційних покривів, електроосадених із суспензійних метансульфонатних розчинів показало, що збільшення концентрації дисперсної фази в розчині приводить до підвищення ступеня неоднорідності поверхні (рис. 5). Поверхня композитів є нерівною і більш шорсткою.

При підвищенні концентрації титан діоксиду в розчині проявляються включення дисперсної фази, і при концентрації TiO_2 рівній 4 г/л спостерігаються чітко виражені ділянки з включеннями агломератів цих частинок.

Збільшення густини струму електроосадження композитів приводить до формування більш рівномірних осадів без видимих вкраплень агломератів значного розміру (рис. 6).

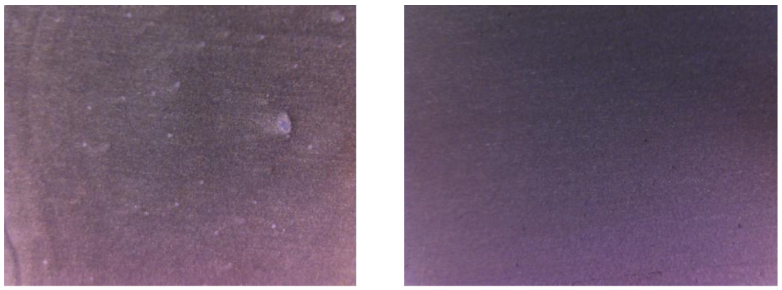
Можливо, швидке оновлення металевої поверхні із зарощенням дрібних частинок дисперсної фази, яке має місце при високих густинах струму, не дозволяє утворюватись на поверхні скупченням агломератів, і зарощення їх в металеву матрицю не відбувається.

Дослідження структури композитів Cu-TiO_2 за допомогою рентгенофазового аналізу встановило, що збільшенню концентрації титан діоксиду в розчині відповідає зменшення розмірів кристалітів мідної матриці. Як було встановлено (рис. 4), збільшення концентрації титан діоксиду в розчині призводить до збільшення вмісту неметалічної фази в композиті. Отже, спостережуваний ефект подрібнення кристалітів обумовлений збільшенням



а б

Рис. 5. Мікрофотографії поверхні мідних композитів, одержаних при густині струму 2 А/дм² із метансульфонатного розчину, що містить титан діоксид, концентрацію, г/л: *а* – 1; *б* – 4. Збільшення зображення ×500



а б

Рис. 6. Мікрофотографії поверхні мідних композитів, одержаних із метансульфонатного розчину, що містить титан діоксид, концентрацію 4 г/л, при густині струму, А/дм²: а – 2; б – 7. Збільшення зображення ×500

сторонньої фази в покриві. Ймовірно, при електрокристалізації міді, в умовах адсорбції на поверхні електроду дисперсної фази, відбувається інгібування росту кристалітів, що призводить до зменшення їх розмірів. Слід відмітити, що в зазначених умовах відбувається збільшення густини дислокацій в покривах. Збільшення концентрації титан діоксиду в розчині, яке відповідальне за збільшення дисперсної фази в композиті, провокує збільшення густини дислокацій в кристалічній структурі мідної матриці. Вочевидь, при формуванні покривів за присутності сторонньої фази на границях кристалітів утруднюється вихід дислокацій кристалітів на зовню, і їх густина збільшується.

Фотокаталітичну активність композитів Cu–TiO_2 можна оцінити по зміні оптичної густини розчину барвника метилового оранжевого при опроміненні його ультрафіолетом за присутності покриву Cu–TiO_2 (рис. 7). В результаті опромінення відбувається фотодеструкція барвника, і його концентрація в розчині зменшується. Відповідно, спостерігається зменшення оптичної густини розчину.

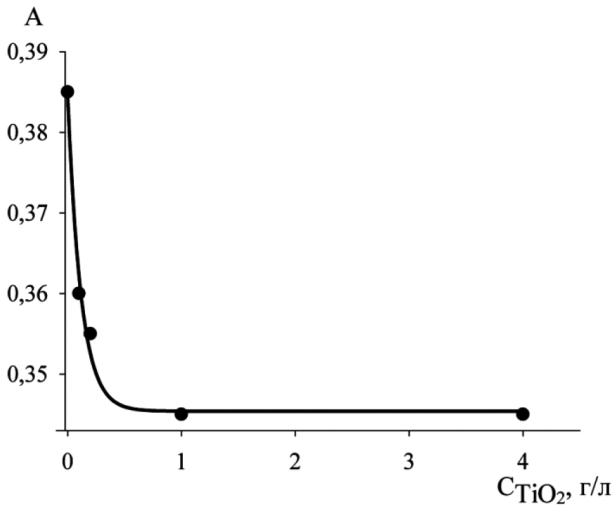


Рис. 7. Залежність ступеню фотодеструкції метилового оранжевого від концентрації титан діоксиду

Зазначимо, що процес фотодеструкції метилового оранжевого (МО) можна представити наступними рівняннями, які протікають на поверхні фотокаталізатору:

$$2Cu–TiO_2 + h\nu \rightarrow Cu–TiO_2(e^-) + Cu–TiO_2(h^+) \quad (5)$$

$$Cu–TiO_2(h^+) + H_2O_{адс} \rightarrow Cu–TiO_2 + {}^{\bullet}OH_{адс} + H^+ \quad (6)$$

$$МО + {}^{\bullet}OH_{адс} \rightarrow \text{продукти фотодеструкції} \quad (7)$$

Під дією ультрафіолетового опромінювання електрони на поверхні $Cu–TiO_2$ переходять з валентної зони в зону провідності, що призводить до утворення електронно-діркової пари. Дірка, мігрує на поверхню титан диоксиду і розкладає адсорбовану воду з утворенням гідроксильного радикалу. Останній, в силу високої реакційної здатності, взаємодіє з адсорбованим на поверхні композиту барвником.

Осади з великим вмістом фотокаталітично активного титан діоксиду забезпечують більш повну деструкцію метилового оранжевого в порівнянні з покривами з невеликим вмістом дисперсної фази.

При формуванні плівок композитів $Cu–TiO_2$ з використанням сульфатних розчинів виникає проблема коагуляції дисперсної фази, що ускладнює одержання покривів із високим вмістом TiO_2 при низькій його концентрації в електроліті. Спроба підвищити вміст діоксиду титану призводить до осідання частинок, що, у свою чергу, вимагає посиленого перемішування розчину. Передбачається, що ці технологічні труднощі можна значною мірою усунути шляхом застосування метансульфонатного розчину, який завдяки менш вираженій коагулюючій здатності аніонів демонструє кращу стабільність дисперсної системи порівняно із сульфатними аналогами. У зв'язку з цим актуальним є вивчення седиментаційних процесів у метансульфонатних розчинах та процесів електроосадження і властивостей композиційних плівок на основі міді.

Висновки

Встановлено залежності вмісту дисперсної фази в композитах $Cu–TiO_2$ від концентрації титан діоксиду в розчині і густини струму електроосадження. Збільшення концентрації TiO_2 до 4 г/л приводить до збільшення вмісту дисперсної фази в осадах до 1,3 мас.% при густині струму 2 А/дм^2. При підвищенні густини струму до 7 А/дм^2 відповідне значення становить 0,8 мас.%.

За допомогою мікрофотографій встановлено, що морфологія поверхні композитів є шорсткою. Збільшення вмісту дисперсної фази в осадах збільшує шорсткість покривів.

Рентгенофазові дослідження структури композитів $Cu–TiO_2$ показали, що інкорпорація дисперсної фази в мідну матрицю призводить до подрібнення кристалітів та збільшення в них густини дислокацій. Це пов'язано зі зміною режиму електрокристалізації міді, в умовах адсорбції на поверхні електроду дисперсної фази. Остання інгібує зростання кристалітів та загальмовує вихід дислокацій.

Встановлена фотокаталітична активність композитів $Cu–TiO_2$, осаджених із метансульфонатного розчину. Показано, що збільшення вмісту титан діоксиду в розчині призводить до збільшення вмісту дисперсної фази в покривах $Cu–TiO_2$ і зростання їх фотокаталітичної активності.

Список використаної літератури

1. Aruna S. T., Muniprakash M., Grips V. W. Effect of titania particles preparation on the properties of $Ni–TiO_2$ electrodeposited composite coatings. *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol. 43(8). 2013. P. 805–815.

2. Mohajeri S., Dolati A., Ghorbani M. The influence of pulse plating parameters on the electrocodeposition of $Ni–TiO_2$ nanocomposite single layer and multilayer structures on copper substrates. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 262. 2015. P. 173–183.

3. Walsh F. C., Low C. T. J., Bello J. O. Influence of surfactants on electrodeposition of a Ni-nanoparticulate SiC composite coating. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. Vol. 93(13). 2015. P. 147–156.

4. Яворська Н. М., Підгайчук С. Я., Дробот О. С. Оцінка зносостійкості композиційних електрохімічних покриттів на основі нікелю з нановключеннями нітридів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Т.5. 2015. С. 33–37.

5. Aliofkhazraei M., Ahangarani S., Rouhaghdam A. S. Effect of the duty cycle of pulsed current on nanocomposite layers formed by pulsed electrodeposition. *Rare metals*. Vol. 29(2). 2010. P. 209–213.

6. Wang L., Li Y., Yin X., Wang Y., Lu L., Song A., Shao G. Comparison of three nickel-based carbon composite catalysts for hydrogen evolution reaction in alkaline solution. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 42(36). 2017. P. 22655–22662.

7. Mahlambi M. M., Mishra A. K., Mishra S. B., Raichur A. M., Mamba B. B., Krause R. W. Layer-by-layer self-assembled metal-ion-(Ag-, Co-, Ni-, and Pd-) doped TiO_2 nanoparticles: synthesis, characterisation, and visible light degradation of Rhodamine B. *Journal of Nanomaterials*. Vol. 2012. 2012. P. 1–12.

8. Fan L., Long J., Gu Q., Huang H., Lin H., Wang X. Single-site nickel-grafted anatase TiO_2 for hydrogen production: toward understanding the nature of visible-light photocatalysis. *Journal of Catalysis*. Vol. 320. 2014. P. 147–159.

9. Liu Q., Ding D., Ning C., Wang X. Cobalt-phosphate/Ni-doped TiO_2 nanotubes composite photoanodes for solar water oxidation. *Materials Science and Engineering: B*. Vol. 202. 2015. P. 54–60.

10. Gupta S., Tripathi M. A review on the synthesis of TiO_2 nanoparticles by solution route. *Open Chemistry*. Vol. 10. 2012. P. 279–294.

11. Oskam G., Nellore A., Penn R. L., Searson P. C. The growth kinetics of TiO_2 nanoparticles from titanium (IV) alkoxide at high water/titanium ratio. *The Journal of Physical Chemistry B*. Vol. 107. 2003. P. 1734–1738.

12. Banfield, J. Thermodynamic analysis of phase stability of nanocrystalline titania. *Journal of Materials Chemistry.* Vol. 8. 1998. P. 2073–2076.

13. Zhang H., Banfield J. F. New kinetic model for the nanocrystalline anatase-to-rutile transformation revealing rate dependence on number of particles. *American Mineralogist*. Vol. 84. 1999. P. 528–535.

14. Ranade M. R., Navrotsky A., Zhang H. Z., Banfield J. F., Elder S. H., Zaban A., Whitfield H. J. Energetics of nanocrystalline TiO_2. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 99. 2002. P. 6476–6481.

15. Zhang H., Banfield J. F. Size dependence of the kinetic rate constant for phase transformation in TiO_2 nanoparticles. *Chemistry of materials*. Vol. 17. 2005. P. 3421–3425.

16. Gupta V. K., Jain R., Nayak A., Agarwal S., Shrivastava M. Removal of the hazardous dye-Tartrazine by photodegradation on titanium dioxide surface. *Materials Science and Engineering: C*. Vol. 31. 2011. P. 1062–1067.

17. Davis R. J., Gainer J. L., O'Neal G., Wu I. W. Photocatalytic decolorization of wastewater dyes. *Water Environment Research*. Vol. 66. 1994. P. 50–53.

18. Ochiai T., Fujishima A. Photoelectrochemical properties of TiO_2 photocatalyst and its applications for environmental purification. *Journal of Photochemistry and photobiology C: Photochemistry reviews*. Vol. 13. 2012. P. 247–262.

19. Hashimoto K., Irie H., Fujishima A. TiO_2 photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Japanese journal of applied physics*. Vol. 44. 2005. P. 8269–8285.

20. Nakata K., Ochiai T., Murakami T., Fujishima A. Photoenergy conversion with TiO_2 photocatalysis: new materials and recent applications. *Electrochimica Acta*. Vol. 84. 2012. P. 103–111.

21. Spanou S., Kontos A. I., Siokou A., Kontos A. G., Vaenas N., Falaras P., Pavlatou E. A. Self cleaning behaviour of Ni/nano-TiO_2 metal matrix composites. *Electrochimica Acta*. Vol. 105. 2013. P. 324–332.

22. Walsh F. C., Ponce de Leon C. A review of the electrodeposition of metal matrix composite coatings by inclusion of particles in a metal layer: an established and diversifying technology. *Transactions of the IMF*. Vol. 92. 2014. P. 83–98.

23. Zeng Y. B., Qu N. S., Hu X. Y. Preparation and Characterization of Electrodeposited $NiCeO_2$ Nanocomposite Coatings with High Current Density. *International journal of electrochemical science*. Vol. 9. 2014. P. 8145–54.

24. Zhang Z., Jiang C., Wu X., Ma N. Effect of particle concentration on property of electrodeposited Ni-ZrC nanocomposites. *Materials Research Innovations*. Vol. 18. 2014. P. 146–151.

25. Garcia I., Fransaer J., Celis J. P. Electrodeposition and sliding wear resistance of nickel composite coatings containing micron and submicron SiC particles. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 148. 2001. P. 171–178.

26. Ebrahimi F., Ahmed Z. The effect of current density on properties of electrodeposited nanocrystalline nickel. *Journal of Applied Electrochemistry*. Vol. 33. 2003. P. 733–739.

27. Li Y., Wu K., Zhitomirsky I. Electrodeposition of composite zinc oxide–chitosan films. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 356(1–3). 2010. P. 63–70.

28. Schrand A. M., Flens S. A. C., Shenderov O. A. Nanodiamond Particles: Properties and Perspectives for Bioapplications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. Vol. 34(1). 2009. P. 18–74.

29. Bercot, P., Pena-Munoz E., Pagetti J. Electrolytic composite Ni-PTFE coatings: an adaptation of Guglielmi's model for the phenomena of incorporation. *Surface and Coatings Technology*. Vol. 157(2). 2002. P. 282–289.

References

1. Aruna S. T., Muniprakash M., Grips V. W. (2013) Effect of titania particles preparation on the properties of Ni–TiO_2 electrodeposited composite coatings. *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 43(8), pp. 805–815.

2. Mohajeri S., Dolati A., Ghorbani M. (2015) The influence of pulse plating parameters on the electrocodeposition of Ni–TiO_2 nanocomposite single layer and multilayer structures on copper substrates. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 262, pp.173–183.

3. Walsh F. C., Low C. T. J., Bello J. O. (2015) Influence of surfactants on electrodeposition of a Ni-nanoparticulate SiC composite coating. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, Vol. 93(13), pp.147–156.

4. Yavorska N. M., Pidhaichuk S. Ya., Drobot O. S. (2015) Otsinka znosostiikosti kompozytsiinykh elektrokhimichnykh pokryttiv na osnovi nikeliu z nanovkliuchenniamy nitrydiv. [Evaluation of wear resistance of nickel-based composite electrochemical coatings with nitride nanoinclusions]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, no. 5, pp. 33–37.

5. Aliofkhazraei M., Ahangarani S., Rouhaghdam A. S. (2010) Effect of the duty cycle of pulsed current on nanocomposite layers formed by pulsed electrodeposition. *Rare metals*, Vol. 29(2), pp. 209–213.

6. Wang L., Li Y., Yin X., Wang Y., Lu L., Song A., Shao G. (2017) Comparison of three nickel-based carbon composite catalysts for hydrogen evolution reaction in alkaline solution. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42(36), pp. 22655–22662.

7. Mahlambi M. M., Mishra A. K., Mishra S. B., Raichur A. M., Mamba B. B., Krause R. W. (2012) Layer-by-layer self-assembled metal-ion-(Ag-, Co-, Ni-, and Pd-) doped TiO_2 nanoparticles: synthesis, characterisation, and visible light degradation of Rhodamine B. *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2012, pp. 1–12.

8. Fan L., Long J., Gu Q., Huang H., Lin H., Wang X. (2014) Single-site nickel-grafted anatase TiO_2 for hydrogen production: toward understanding the nature of visible-light photocatalysis. *Journal of Catalysis*, Vol. 320, pp. 147–159.

9. Liu Q., Ding D., Ning C., Wang X. (2015) Cobalt-phosphate/Ni-doped TiO_2 nanotubes composite photoanodes for solar water oxidation. *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 202, pp. 54–60.

10. Gupta S., Tripathi M. (2012) A review on the synthesis of TiO_2 nanoparticles by solution route. *Open Chemistry*, Vol. 10, pp. 279–294.

11. Oskam G., Nellore A., Penn R. L., Searson P. C. (2003) The growth kinetics of TiO_2 nanoparticles from titanium (IV) alkoxide at high water/titanium ratio. *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 107, pp. 1734–1738.

12. Banfield, J. (1998) Thermodynamic analysis of phase stability of nanocrystalline titania. *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 8, pp. 2073–2076.

13. Zhang H., Banfield J. F. (1999) New kinetic model for the nanocrystalline anatase-to-rutile transformation revealing rate dependence on number of particles. *American Mineralogist*, Vol. 84, pp. 528–535.

14. Ranade M. R., Navrotsky A., Zhang H. Z., Banfield J. F., Elder S. H., Zaban A., Whitfield H. J. (2002) Energetics of nanocrystalline TiO_2. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 99, pp. 6476–6481.

15. Zhang H., Banfield J. F. (2005) Size dependence of the kinetic rate constant for phase transformation in TiO_2 nanoparticles. *Chemistry of materials*, Vol. 17, pp. 3421–3425.

16. Gupta V. K., Jain R., Nayak A., Agarwal S., Shrivastava M. (2011) Removal of the hazardous dye-Tartrazine by photodegradation on titanium dioxide surface. *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 31, pp. 1062–1067.

17. Davis R. J., Gainer J. L., O'Neal G., Wu I. W. (1994) Photocatalytic decolorization of wastewater dyes. *Water Environment Research*, Vol. 66, pp. 50–53.

18. Ochiai T., Fujishima A. (2012) Photoelectrochemical properties of TiO_2 photocatalyst and its applications for environmental purification. *Journal of Photochemistry and photobiology C: Photochemistry reviews*, Vol. 13, pp. 247–262.

19. Hashimoto K., Irie H., Fujishima A. (2005) TiO_2 photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Japanese journal of applied physics*, Vol. 44, pp. 8269–8285.

20. Nakata K., Ochiai T., Murakami T., Fujishima A. (2012) Photoenergy conversion with TiO_2 photocatalysis: new materials and recent applications. *Electrochimica Acta*, Vol. 84, pp. 103–111.

21. Spanou S., Kontos A. I., Siokou A., Kontos A. G., Vaenas N., Falaras P., Pavlatou E. A. (2013) Self cleaning behaviour of Ni/nano-TiO_2 metal matrix composites. *Electrochimica Acta*, Vol. 105, pp. 324–332.

22. Walsh F. C., Ponce de Leon C. (2014) A review of the electrodeposition of metal matrix composite coatings by inclusion of particles in a metal layer: an established and diversifying technology. *Transactions of the IMF*, Vol. 92, pp. 83–98.

23. Zeng Y. B., Qu N. S., Hu X. Y. (2014) Preparation and Characterization of Electrodeposited $NiCeO_2$ Nanocomposite Coatings with High Current Density. *International journal of electrochemical science*, Vol. 9, pp. 8145–8154.

24. Zhang Z., Jiang C., Wu X., Ma N. (2014) Effect of particle concentration on property of electrodeposited Ni–ZrC nanocomposites. *Materials Research Innovations*, Vol. 18, pp. 146–151.

25. Garcia I., Fransaer J., Celis J. P. (2001) Electrodeposition and sliding wear resistance of nickel composite coatings containing micron and submicron SiC particles. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 148, pp. 171–178.

26. Ebrahimi F., Ahmed Z. (2003) The effect of current density on properties of electrodeposited nanocrystalline nickel. *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 33, pp. 733–739.

27. Li, Y., Wu, K., & Zhitomirsky, I. (2010). Electrodeposition of composite zinc oxide–chitosan films. Colloids and Surfaces A: *Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 356(1–3), pp. 63–70.

28. Schrand A. M., Flens S. A. C., Shenderov O. A. (2009) Nanodiamond Particles: Properties and Perspectives for Bioapplications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, Vol. 34(1), pp. 18–74.

29. Bercot, P., Pena-Munoz E., Pagetti J. (2002) Electrolytic composite Ni-PTFE coatings: an adaptation of Guglielmi's model for the phenomena of incorporation. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 157(2), pp. 282–289.

UDC 656.02 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.32

V. P. SLAVYCH
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-7882-4198

TRANSPORT SYSTEM MANAGEMENT MODEL IN THE CONDITIONS OF A REDUCTION IN THE NUMBER OF PASSENGERS OR CARRIERS

One of the key aspects of the efficient functioning of the transport system is the calculation of correspondence matrices that reflect the relationships between different points of transport routes. These matrices are the basis for planning and optimizing passenger transportation, allowing to assess passenger flows, the convenience of transfers and the time spent on movement between points. However, in conditions of a decrease in the number of passengers and/or carriers, there is a need to adjust existing models to maintain the efficiency of the transport network. The decrease in the number of passengers can be the result of various factors: economic changes, a decrease in demand for certain routes, natural or man-made disasters, as well as the consequences of global crises or military operations. In addition, a decrease in the number of carriers due to economic difficulties or financial constraints can lead to a reduction in the number of flights and a change in transportation schedules. In such conditions, the transport system must adapt to new realities, which requires accurate calculation and adjustment of correspondence matrices to ensure continuous operation and optimal use of limited resources. The purpose of the work is to develop models for calculating correspondence matrices that take into account the reduction in the number of both passengers and carriers, taking into account the new conditions of demand for transport services. Which in turn provides more accurate forecasting of passenger flows and more efficient use of limited transport network resources, taking into account the reduction in demand for certain routes and the limited number of available carriers. The model allows you to optimize the frequency of flights by changing the intervals between trips, as well as redistribute passenger flows between different routes, which allows you to maintain a high level of service under conditions of reduced transportation.

Key words: *passenger transportation, correspondence matrix, route transportation.*

В. П. СЛАВИЧ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-7882-4198

МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ ЗМЕНШЕННЯ КІЛЬКОСТІ ПАСАЖИРІВ АБО ПЕРЕВІЗНИКІВ

Одним із ключових аспектів ефективного функціонування транспортної системи є розрахунок матриць кореспонденцій, що відображають взаємозв'язки між різними точками транспортних маршрутів. Ці матриці є основою для планування та оптимізації пасажирських перевезень, дозволяючи оцінити потоки пасажирів, зручність пересадок та час, що витрачається на переміщення між пунктами. Однак, в умовах зменшення кількості пасажирів та/або перевізників виникає необхідність у коригуванні існуючих моделей для підтримки ефективності транспортної мережі. Зменшення кількості пасажирів може бути результатом різних факторів: економічних змін, зниження попиту на певні маршрути, природних чи техногенних катастроф, а також наслідків глобальних криз або військових дій. Крім того, зменшення кількості перевізників через економічні труднощі чи фінансові обмеження може спричинити скорочення кількості рейсів та зміну графіків перевезень. У таких умовах транспортна система повинна адаптуватися до нових реалій, що вимагає точного розрахунку та коригування матриць кореспонденцій для забезпечення безперервного функціонування і оптимального використання обмежених ресурсів. Метою роботи є розробка моделей розрахунку матриць кореспонденцій, які враховують зменшення кількості як пасажирів, так і перевізників, з урахуванням нових умов попиту на транспортні послуги. Що в свою чергу забезпечує точніше прогнозування пасажиропотоків та ефективніше використання обмежених ресурсів транспортної мережі, враховуючи зниження попиту на певні маршрути та обмежену кількість доступних перевізників. Модель дозволяє оптимізувати частоту рейсів, змінюючи інтервали між поїздками, а також перерозподіляти пасажирські потоки між різними маршрутами, що дозволяє зберегти високий рівень обслуговування за умов зменшення перевезень.

Ключові слова: *пасажирські перевезення, матриця кореспонденцій, маршрутні перевезення.*

Formulation of the problem

Calculating correspondence matrices in conditions of reduced passenger numbers requires adjusting passenger flow parameters, which allows for the effective adaptation of the transport system to new conditions. The decrease in the number of passengers leads to the necessity of revising the frequency of services, which affects transfer times and the intensity of connections between transport hubs. As a result of adjusting the intervals of movement, the number of transport units on the route, and the redistribution of passenger flows, there is a change in the structure of the correspondence matrix, which takes into account new demand and supply zones.

Mathematically, this can be achieved through modeling various scenarios of changes in passenger flows and their distribution among routes. New data on the decrease in the number of passengers and changes in routes are taken into account, allowing for the optimization of transportation, reduction of costs, and improvement of the efficiency of the transport network. Updated correspondence matrices help reduce unjustified resource expenditures and enhance convenience for the passengers remaining in the system, ensuring better adaptation of the transport infrastructure to new conditions.

Analysis of recent research and publications

The analysis of recent studies in the field of calculating correspondence matrices for passenger transport under conditions of reduced passenger numbers indicates the development of modeling and data processing methods for adaptation to new conditions. In particular, in [1], methods for forming such matrices are discussed, emphasizing the advantages of fuzzy logic models for obtaining reliable results with limited information.

In the work [3], a new modeling method is proposed that takes into account the interval concept of transport demand. This approach allows for the formation of a set of matrices that reflect possible states of demand, providing flexibility and adaptability of the model to changes in passenger flow. Such methods are particularly relevant in conditions of reduced passenger numbers, as they allow for a more accurate reflection of real conditions and effective planning of transport services.

The study [8] examines models for optimizing metro frequency considering social distancing measures during the pandemic. These models help assess the impact of various social distancing policies on operational and passenger costs, which is relevant in the context of reduced passenger numbers and the need to adapt transport services to new conditions.

The analysis of the works of foreign and domestic researchers has shown that different techniques and methods for calculating correspondence matrices are applied in various regions under conditions of reduced passenger numbers [2, 4–7].

These studies emphasize the importance of adapting methods for calculating correspondence matrices to changing passenger flow conditions, ensuring effective planning and management of transport systems.

Formulation of the purpose of the research

The purpose of the work is to develop models for calculating correspondence matrices that take into account changes in the number of passengers and/or the number of carriers, considering new conditions of demand for transport services. This approach involves the development of methods for adapting to reduced demand, optimizing service frequency, and maintaining the efficiency of transfers between different modes of transport.

Presentation of the main research material

Let us consider the transport network of a certain city, which consists of transport districts between which passengers move using public road transport.

For further considerations, we will assume that public transport is not divided into different types, but is represented by one type, for example, buses.

We will build a model and consider the method for calculating the passenger correspondence matrix under conditions of reduced passenger numbers, which may occur due to external constraints.

The decrease in the number of passengers may be the result of various factors: economic changes, a decrease in demand for certain routes, natural or man-made disasters, as well as the consequences of global crises or military actions.

We will introduce the necessary input and output parameters of the specified model for calculating the passenger correspondence matrix and group them in the form of table 1.

Then the calculation of passenger correspondence matrices under conditions of a decrease in the number of passengers, which occurs as a result of limiting the number of labor migrations in transport services, will be determined using the following expressions:

$$D_j = \beta \cdot \alpha \cdot (N_j - A_j),$$

$$Q_i = N_i \cdot \frac{\sum_{j=1}^{M} (\beta \cdot \alpha \cdot (N_j - A_j))}{N},$$

where α is the passenger capacity limitation coefficient and is determined by the dependence:

$$\alpha = \frac{P_{сид}}{P},$$

$$P = P_{сид} + P_{сто}.$$

Table 1

Model parameters

No.	Marking	Name	Unit of measurement
Input parameters			
1	l_{ij}	Distance between districts i and j	m
2	S_{mp}	Area of the transport district	m^2
3	N	Number of departure zones	units
4	M	Number of arrival zones	units
5	$V_{пас}$	Average passenger speed	m/s
6	Imax	Maximum vehicle movement interval	s
7	Imin	Minimum vehicle movement interval	s
8	N_i	Population of the transport area by departure i	persons
9	N_j	Number of jobs in the district upon arrival j	persons
10	$N_{\max}$	Maximum population among all transport areas by departure i	persons
11	$N_{\min}$	Minimum population among all transport areas by departure i	persons
12	N	City population	persons
13	β	Percentage of job vacancies	–
14	$P_{сто}$	Standing passenger capacity	persons
15	$P_{сид}$	Passenger seating capacity	persons
16	A_j	Number of non-resident population of the jth district by arrival	persons
Output parameters			
17	k_j	Adjustment factor	–
18	Q_i	Capacity of the i-th district by departure	persons
19	D_j	Capacity of the jth district upon arrival	persons
20	c_{ij}	The coefficient of attraction of districts i and j	–
21	t_n	Average travel time	s
22	I	Vehicle movement interval	s

Now let us consider the method of calculating the matrix of passenger correspondences in conditions of a decrease in the number of carriers on routes.

Let us introduce additional necessary parameters, which are grouped in Table 2.

Table 2

Additional model parameters

No.	Marking	Name	Unit of measurement
Input par#meters			
1	$N_{вод0}$	Initial number of drivers on the route	persons
2	$N_{хвв}$	Number of drivers who did not go on the route	persons
Intermediate parameters			
3	$N_{вод}$	Actual number of drivers on the route	persons
4	γ	Vehicle reduction factor on the route	–

Then the values of the required capacities for departures and arrivals will be determined by the following dependencies:

$$D_j = \gamma \cdot \beta \cdot \alpha \cdot (N_j - A_j),$$

$$Q_i = N_i \cdot \frac{\sum_{j=1}^{M} (\gamma \cdot \beta \cdot \alpha \cdot (N_j - A_j))}{N},$$

$$\gamma = \frac{N_{вод}}{N_{вод0}},$$

$$N_{вод} = N_{вод0} - N_{хв}.$$

Vehicle movement intervals for transport areas will also change, which will be determined using the expressions:

$$I_i = \frac{I_{\max} - \frac{N_i - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}} \cdot (I_{\max} - I_{\min})}{\gamma}.$$

Then the travel time is found by the formula:

$$t_{n=}\frac{\sqrt{\frac{S_{mp}}{\pi}}}{V_{nac}}\cdot 120+\frac{I_{\max}-\frac{N_i-N_{\min}}{N_{\max}-N_{\min}}\cdot(I_{\max}-I_{\min})}{\frac{\gamma}{2}}+\frac{l_{ij}}{V_{mc}}\cdot 60.$$

Conclusions

Thus, the model for calculating passenger correspondence matrices, which takes into account the reduction in the number of passengers and/or the reduction in the number of carriers, allows adapting transport systems to new operating conditions. Such solutions will provide more accurate forecasting of passenger flows and more efficient use of limited transport network resources, taking into account the reduction in demand for certain routes and the limited number of available carriers. The model allows optimizing the frequency of flights by changing the intervals between trips, as well as redistributing passenger flows between different routes, which allows maintaining a high level of service under conditions of reduced transportation.

Bibliography

1. Білоус А. Б., Демчук І. А. Аналіз методів та моделей розрахунку обсягу пасажирських кореспонденцій. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2014. № 3(3). С. 53–57.

2. Горбачов П. Ф., Любий Є. В., Ковцур К. Г., Цинь Сяосюань. Щодо питання моделювання елементів матриць кореспонденцій в рамках інтервальної концепції формування моделей транспортного попиту. Напрямки розвитку технологічних систем і логістики в АПВ. Матеріали V-ї Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (23 травня 2024). Харків : ДБТУ. 2024. С. 48–49.

3. Любий Є., Ковцур К., Цинь С. Постановка задачі випадкового заповнення матриці пасажирських кореспонденцій. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2024. № 2(23), С. 152–158.

4. Понкратов Д. П., Фалецька Г. І. Вибір пасажирами шляхів пересування в містах : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 164 с.

5. Славич В. П., Лівандовський В. С. Модель системи управління пішохідним потоком міста. *Вісник ХНТУ*. 2021. № 2(77). С. 47–51.

6. Славич В. П., Марчук Н. В. Модель визначення пасажирських кореспонденцій м. Херсон в умовах зменшення кількості перевізників. *Синергія науки і бізнесу у повоєнному відновленні Херсонщини* : матеріали Міжнародної наук.-практ. конф. Одеса, 2023. С. 316–318.

7. Чижик В. М. Розробка аналітичних моделей визначення часу очікування пасажирами маршрутного транспорту в містах : автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.22.01. Харків, 2019. 20 с.

8. Konstantinos Gkiotsalitis, Oded Cats. Optimal frequency setting of metro services in the age of COVID-19 distancing measures. *Transportmetrica A: Transport Science*. 2022. Vol. 18, No 3. P. 807–827.

References

1. Bilous A. B., Demchuk I. A. (2014). Analiz metodiv ta modelei rozrakhunku obsiahu pasazhyrskykh korespondentsii. Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2014. № 3(3). P. 53–57.

2. Horbachov P., Liubyi Ye., Kovtsur K., & Qin X. (2024). On the issue of modeling the elements of OD-matrices within the framework of interval concept of transport demand models forming. Napriamky rozvytku tekhnolohichnykh system i lohistyky v APV. Materialy V-yi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii (23 travnia 2024). Kharkiv : DBTU. P. 48–49.

3. Liubyi Ye., Kovtsur K., Tsyn S. (2024). Postanovka zadachi vypadkovoho zapovnennia matrytsi pasazhyrskykh korespondentsii. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti. 2024. № 2(23), P. 152–158.

4. Ponkratov D. P., Falets′ka H. I. (2015). Vybir pasazhyramy shlyakhiv peresuvannya v mistakh : monohrafiya. Kharkiv : KHNUMH im. O. M. Beketova, 164 p.

5. Slavych V. P., Livandovskyi V. S. (2021). Model systemy upravlinnia pishokhidnym potokom mista. Visnyk KhNTU. 2021. № 2(77). P. 47–51.

6. Slavych V. P., Marchuk N. V. (2023). Model vyznachennia pasazhyrskykh korespondentsii m. Kherson v umovakh zmenshennia kilkosti pereviznykiv. Synerhiia nauky i biznesu u povoiennomu vidnovlenni Khersonshchyny : materialy Mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf. Odesa, 2023. P. 316–318.

7. Chyzhyk V. M. (2019). Rozrobka analitychnykh modelei vyznachennia chasu ochikuvannia pasazhyramy marshrutnoho transportu v mistakh : avtoref. dys.... kand. tekhn. nauk : 05.22.01. Kharkiv, 2019. 20 p.

8. Konstantinos Gkiotsalitis, Oded Cats. (2022). Optimal frequency setting of metro services in the age of COVID-19 distancing measures. *Transportmetrica A: Transport Science*. 2022. Vol. 18, No 3. P. 807–827.

УДК 629.735 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.33

І. М. СОЛОВЕЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електротехнологій та експлуатації енергообладнання
Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів
і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»
ORCID: 0000-0003-4715-3795

Р. М. ТРІЩ
доктор технічних наук,
професор кафедри мехатроніки та електротехніки
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-9503-8428

Е. А. ХОМ'ЯК
доктор філософії,
старший викладач кафедри мехатроніки та електротехніки
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-2579-2986

В. М. БУРДЕЙНА
кандидат технічних наук,
доцент кафедри мехатроніки та електротехніки
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0009-0005-5065-4007

О. М. КОСИЧЕНКО
старший викладач кафедри мехатроніки та електротехніки
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0009-0003-9140-4632

А. О. БОЯРКІН
старший викладач кафедри мехатроніки та електротехніки
Національний аерокосмічний «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0003-3210-1482

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ВОДОВІДШТОВХУВАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ ЛОПАТЕЙ ПОВІТРЯНОГО ГВИНТА НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ І АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

У статті розглянуто методи підвищення енергоефективності повітряних гвинтів фіксованого та змінного кроку шляхом нанесення інноваційного електростатичного водовідштовхувального покриття на поверхню лопатей. Задача дослідження полягала у розробці методів, що дозволяють зменшити лобовий опір гвинта, що сприяє зменшенню витрат енергії та покращенню енергоефективності роботи гвинтомоторної групи. Вивчено вплив водовідштовхувальних покриттів на зменшення опору повітря та покращення аеродинамічних характеристик, що безпосередньо впливає на економію палива та підвищення ефективності енергоспоживання. Для досягнення поставленої мети в статті запропоновано використовувати електростатичні покриття, що дозволяють мінімізувати негативний вплив вологості на поверхню лопатей і знижують тертя між лопаттю та потоком повітря. Проведено порівняльний аналіз ефективності різних способів підвищення енергоефективності гвинтів, а також оцінку економічної вигоди від застосування водовідштовхувальних покриттів. Результати досліджень підтвердили, що нанесення таких покриттів дозволяє зменшити лобовий опір гвинта, що у свою чергу сприяє підвищенню тяги та значному зниженню енергетичних витрат на роботу гвинта. Це також дозволяє досягти зниження витрати палива та поліпшити паливно-економічні характеристики гвинтомоторних установок, що має прямий вплив на енергетичну ефективність авіаційної техніки. Завдяки зменшенню опору й покращенню аеродинамічних властивостей, використання електростатичних водовідштовхувальних покриттів також має перспективи для зниження енергетичних витрат в умовах змінних погодних факторів, таких як високі рівні вологості. Отримані результати мають потенціал для значного вдосконалення ефективності авіаційних систем, зниження їх енергоспоживання та підвищення загальної енергетичної ефективності. Дослідження надають нові

можливості для розвитку енергоефективних технологій у галузі авіації та енергетики, що сприяє не лише підвищенню продуктивності, але й зниженню екологічного впливу завдяки економії енергії та зменшенню викидів CO_2.

Ключові слова: *повітряний гвинт, зниження енергетичних витрат, аеродинамічні характеристики, покриття, електростатичні сили, лобовий опір, енергоефективність.*

I. M. SOLOVEY
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electrical Technologies
and Power Equipment Operation
of the Berezhany Agrotechnical Institute of Ukraine
ORCID: 0000-0003-4715-3795

R. M. TRISHCH
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Mechatronics
and Electrical Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-9503-8428

E. A. KHOMIAK
Doctor of Philosophy,
Senior Lecturer at the Department of Mechatronics
and Electrical Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-2579-2986

V. M. BURDEINA
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Mechatronics
and Electrical Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0009-0005-5065-4007

O. M. KOSYCHENKO
Senior Lecturer at the Department of Mechatronics
and Electrical Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0009-0003-9140-4632

A. O. BOYARKIN
Senior Lecturer at the Department of Mechatronics
and Electrical Engineering
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0003-3210-1482

INFLUENCE OF ELECTROSTATIC WATER-REPELLENT COATING OF PROPELLER BLADES ON ENERGY EFFICIENCY AND AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

The article discusses methods for improving the energy efficiency of fixed and variable pitch propellers by applying an innovative electrostatic water-repellent coating to the blade surface. The objective of the study was to develop methods to reduce the propeller drag, which helps to reduce energy consumption and improve the energy efficiency of the propeller group. The effect of water-repellent coatings on reducing air resistance and improving aerodynamic characteristics, which directly affects fuel economy and energy efficiency, has been studied.

To achieve this goal, the article proposes to use electrostatic coatings that minimize the negative impact of humidity on the blade surface and reduce friction between the blade and air flow. A comparative analysis of the effectiveness of various methods of improving the energy efficiency of propellers was carried out, as well as an assessment of the economic benefits of using water-repellent coatings.

The results of the research confirmed that the application of such coatings can reduce the drag of the propeller, which in turn contributes to increased thrust and a significant reduction in energy costs for the operation of the propeller. It also helps to reduce fuel consumption and improve the fuel and economic characteristics of propeller systems, which has a direct impact on the energy efficiency of aircraft.

By reducing drag and improving aerodynamic properties, the use of electrostatic water-repellent coatings also has the potential to reduce energy costs in conditions of variable weather factors, such as high humidity levels. The results obtained have the potential to significantly improve the efficiency of aviation systems, reduce their energy consumption and increase overall energy efficiency.

The research provides new opportunities for the development of energy-efficient technologies in the aviation and energy sectors, which contributes not only to increased productivity but also to reduced environmental impact through energy savings and reduced CO_2 *emissions.*

Key words: *propeller, energy cost reduction, aerodynamic characteristics, coating, electrostatic forces, drag, energy efficiency.*

Постановка проблеми

Покриття повітряних гвинтів (пропелерів) є важливим аспектом в авіаційній промисловості та має великий вплив на ефективність, довговічність та безпеку авіаційної техніки. Пропелери працюють в складних умовах і при цьому піддаються впливу екстремальних температур, високих навантажень, вібрацій і корозії. Тому покриття, яке наноситься на їх поверхню, має забезпечити захист і зниження зносу та підвищити ефективність їх роботи. Ефективність роботи повітряного гвинта, в значній мірі, залежить від правильного підбору його параметрів, конструктивного виконання, а також від покриття поверхні його лопатей [1–5].

Незалежно від типу повітряних гвинтів (металеві, композитні, або з інших матеріалів) покриття завжди відіграє ключову роль у забезпеченні їх тривалого використання та безпеки польотів. Правильно підібране та нанесене покриття може значно покращити продуктивність авіаційної техніки.

Від якості покриття поверхні повітряного гвинта залежить степінь захисту від корозії, оскільки гвинт часто піддається впливу вологи та інших агресивних середовищ. Покриття поверхні повітряного гвинта захищає також від ерозії, при дії частинок пилу та піску, які вдаряються об поверхню лопаті під час польоту і поступово зношують його поверхню [6, 7]. Нанесене покриття з низьким коефіцієнтом тертя знижує лобовий опір гвинта, покращуючи при цьому його аеродинамічні властивості. А теплостійкі покриття дозволяють витримувати високі температури не втрачаючи своїх властивостей [8]. Інноваційним технологічним рішенням є нанопокриття, які завдяки новим технологіям дозволяють наносити ультратонкі шари нанопокриттів, які завдяки покращеним аеродинамічним властивостям не тільки забезпечують захист від ерозії та корозії, але й зменшують опір повітряному потоку.

Правильно підібране та нанесене покриття може значно покращити продуктивність гвинтомоторної установки. Наприклад, зниження лобового опору і зменшення ерозії сприяють збереженню оптимальної форми лопатей, що забезпечує стабільність польоту та знижує навантаження на двигун, а також підвищує економічні показники гвинтомоторної установки.

Сучасні методи підходу до підбору та нанесення покриття на поверхню повітряного гвинта можуть значно покращити продуктивність авіаційної техніки, що зумовлює необхідність проведення порівняльного аналізу останніх досягнень у цій важливій сфері та проведення всебічного огляду існуючих методик обробки поверхні повітряних гвинтів. Отже, виникає необхідність обґрунтування використання електростатичного водовідштовхувального покриття поверхні повітряного гвинта.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в дослідженні впливу електростатичного водовідштовхувального покриття на аеродинамічні характеристики та ефективність роботи повітряних гвинтів, а також в оцінці можливості підвищення їх продуктивності за рахунок зменшення лобового опору, покращення захисту від ерозії та корозії, збереження оптимальної форми лопатей і підвищення економічних показників гвинтомоторних установок.

Викладення основного матеріалу дослідження

На даний час проводиться багато наукових досліджень з проблем підвищення ефективності та надійності повітряних гвинтів [9–10]. Інноваціями в галузі є використання наноматеріалів, композитних сплавів та більш екологічно чистих покриттів які відкривають нові можливості для покращення ефективності та надійності авіаційних компонентів.

Нанопокриття, як правило, є одно- або багатофазними твердими структурами, нанесеними на поверхню, що накладається товщиною близько 100 нм або менше, додаючи певні властивості або функції матеріалу. Різні матеріали демонструють унікальні властивості на нанорозмірі, такі як температура плавлення, електропровідність, магнітна проникність, гідрофобність і хімічна реактивність до ерозії та корозії, але також зменшують опір потоку повітря завдяки покращеним аеродинамічним властивостям [11–12]. Ефективність процесу поверхневого захисту на основі нанотехнологій спеціально розроблених для аеронавігаційних застосувань на літальних апаратах з композитних матеріалів описується в роботах [13–15].

У джерелі [16] розглянуто питання, пов’язані з аеродинамічним проектуванням лопатей повітряного гвинта; наведено основні відомості з вихрової теорії повітряного гвинта; подано метод обліку кінцевих втрат; розглянуто методику вирішення завдань аеродинаміки гвинта та виконання перевірки розрахунку; проаналізовано питання

вибору найвигіднішого гвинта з нескінченною і кінцевою кількістю лопатей; запропоновано методи та алгоритми аеродинамічного проектування лопатей гвинта.

Так як аеродинамічні характеристики являються важливими показниками якості, то проведено аналіз наукових публікацій щодо принципів та методів оцінювання якості. Так, наприклад, у публікаціях [17, 18] представлено методологію застосування кваліметричних методів оцінювання різних об'єктів, застосовуючи нелінійні функціональні залежності. Представлено також методологію оцінювання якості у машинобудуванні, де представлено оптимізацію допусків щодо якості та точності деталей машин.

Дослідники Інституту аеронавтики Ризького технічного університету [19] розробили багатошарове металокерамічне нанопокриття під назвою McBLADE, яке можна використовувати для захисту лопатей компресора та турбіни в сучасних реактивних двигунах із титанових сплавів. Кожен шар покриття надзвичайно тонкий і виконує певну функцію. Перший шар підвищує адгезію до основного матеріалу, а другий – захищає титановий сплав від окислення. Верхній шар забезпечує термозахист і стійкість покриття до стирання, що дозволяє компонентам працювати при високих температурах.

У праці [20] подана методика використання протиобмерзаючого покриття поверхні літака для зменшення трудомісткості та вартості виконання робіт у холодну пору року. Протиобмерзання літаків у холодну погоду може бути дорогим і трудомістким процесом. Було розроблено нанопокриття, які можуть відштовхувати воду та лід, що призводить до економії витрат на обслуговування. Випробування в польоті літака Airbus A320 British Airways продемонстрували покращення гідрофобності поверхні на 20–40 % порівняно з іншими комерційно доступними звичайними покриттями. А також, інноваційні покриття на основі наноструктурованих вуглецевих матеріалів (таких як вуглецеві нанотрубки та оксид графену) зменшують опір повітряному потоку на поверхні літака. Таким чином, зменшується споживання палива та викидів CO_2.

Дослідний проект під назвою ReSiSTant [21], що фінансується програмою ЄС із досліджень та інновацій Horizon 2020, був спрямований на розробку передових нанопокриттів і методів його нанесення для покращення продуктивності та забезпечення стійкості до стирання та корозії. У проекті розглядаються ребристі поверхні, що складаються з дуже маленьких (2–100 мікрон) паралельних канавок для зниження пасивного опору поверхні в літаках нового покоління.

У роботі [22] наводяться матеріали з розрахунково-експериментальних досліджень компонування повітряного гвинта із застосуванням чисельних методів дослідження. Використання нових методів зниження пасивного опору в авіації є одним із найбільш життєздатних підходів до зменшення споживання авіаційного палива, викидів CO2 та створення шуму. Таким чином, мета статті полягає у покращенні основних аеродинамічних характеристик повітряних гвинтів фіксованого та змінного кроку шляхом нанесення електростатичного водовідштовхувального покриття на поверхню лопатей.

Властивості матеріалу на нанорозмірі регулюються міжмолекулярними силами такими як взаємодія Ван-дер-Ваальса, водневими зв'язками та електростатичними силами. Ці міжмолекулярні сили діють на малих масштабах довжини в межах від кількох ангстремів до кількох нанометрів. Коли розміри матеріалу стають такими ж, як відстані між молекулярними силами (тобто нанорозміри) властивості матеріалу різко змінюються [23]. Таким чином, покриття, що складаються з наночастинок, або кількох шарів на нанорозмірі дають можливість досліджувати їх покращені фізичні та хімічні властивості в широкому діапазоні нових застосувань.

При взаємодії поверхні повітряного гвинта з набігаючим потоком повітря необхідно створити найменший опір, оскільки частинки твердої поверхні гвинта будуть стикатися з частинками молекул повітря. В гетерогенних системах, як відомо, розрізняється міжмолекулярна взаємодія всередині фази та між фазами. Електростатичне відштовхування є наслідком кулонівської взаємодії між однаково зарядженими об'єктами. Це явище має фундаментальне значення для розуміння поведінки матеріалів у гетерогенних системах, таких як колоїдні розчини, біополімери та наночастинки. Його контроль дозволяє створювати функціональні матеріали та пристрої [24].

Взаємодію між атомами та молекулами в межах однієї фази називають когезією (від латинського слова cohaesia, що означає «зчеплення») [25]. Саме когезія визначає можливість існування речовин у конденсованому стані та виникає завдяки міжатомним і міжмолекулярним силам різного характеру. До таких сил належать хімічні ковалентні зв'язки, водневі зв'язки, електростатичні взаємодії, а також сили Ван-дер-Ваальса. Когезійні сили часто позначають також як сили атракції, тобто притягання.

Сили Ван-дер-Ваальса виникають через взаємодію короткочасно створених диполів і вважаються найслабшим типом зв'язку. Тимчасовий асиметричний розподіл зарядів в атомі чи молекулі формує миттєвий диполь, який здатен поляризувати сусідні молекули, створюючи нові диполі.

Здатність молекули до поляризації залежить від кількості електронів, що входять до її складу. Чим більша молекула, тим більше електронів у ній і тим значнішими можуть бути внутрішньомолекулярні зміщення заряду. У результаті цього з'являються численні короткочасні часткові електричні заряди (миттєві диполі), що генерують електричне поле. Під впливом цього поля виникають електростатичні сили, які можуть спричиняти притягання чи відштовхування між диполями.

Чим більший розмір молекул речовини, тим більше між ними утворюється взаємодій типу Ван-дер-Ваальса. Енергія когезії, або робота когезії, залежить від енергії яка необхідна для утворення двох поверхонь:

$$W_k = 2\sigma, \tag{1}$$

де σ – поверхневий натяг поверхні. Взаємодія, яка виникає між фазами чи поверхнями тіл різної природи, які вступають у контакт, називають адгезією [26]. Цей процес забезпечує зчеплення поверхонь двох різнорідних тіл завдяки міжмолекулярним взаємодіям (фізичним або хімічним силам). Адгезія проявляється у випадках взаємодії між двома рідинами, рідиною та твердим тілом, а також між двома твердими тілами або поверхнею твердого тіла і газом (у нашому випадку повітрям).

Основним фактором, який сприяє адгезії, є прагнення системи зменшити свою поверхневу енергію, що робить цей процес термодинамічно вигідним і, за певних умов, спонтанним. Міцність утвореного адгезійного контакту характеризується величиною, що називається роботою адгезії (Wa). Вона визначає енергію, необхідну для зворотного розриву контакту, віднесену до одиниці площі взаємодії, і вимірюється в одиницях, аналогічних до поверхневого натягу – джоулів на квадратний метр (Дж/м^2).

Таким чином, робота адгезії Wa є важливим параметром, що дозволяє оцінити силу з'єднання між поверхнями. Для подальшого розуміння процесів адгезії корисно проаналізувати схему змін міжфазних поверхневих натягів, яка ілюструє, як розподіляються сили на межах фазових контактів та як ці сили впливають на стабільність взаємодії, як показано на рисунку 1.

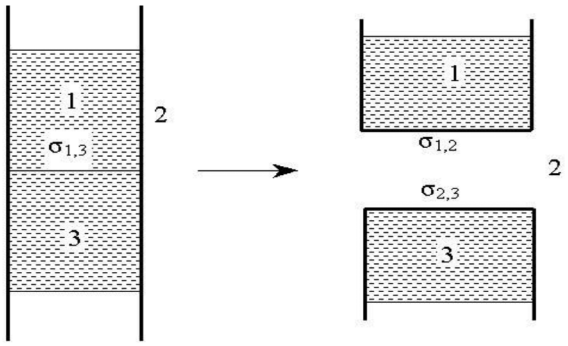


Рис. 1. Зміна міжфазних поверхневих натягів при розділенні рідин 1 і 3 які не змішуються в середовищі газу 2 [27]

Кожна з рідин характеризується міжфазним поверхневим натягом $\sigma_{1,3}$. При розділенні цих рідин утворюються дві нові поверхні: рідина 1, що має поверхневий натяг $\sigma_{1,2}$ і рідина 3 з поверхневим натягом $\sigma_{2,3}$, тоді як поверхня розділу між фазами з натягом $\sigma_{1,3}$ зникає. Робота адгезії (енергія, необхідна для розділення одиниці площі контакту між рідинами) визначається відповідно до рівняння Дюпре [26]:

$$W_a = \sigma_{1,2} + \sigma_{2,3} - \sigma_{1,3}, \tag{2}$$

де $\sigma_{1,2}$ – поверхневий натяг на межі рідина – газ; $\sigma_{2,3}$ – тверде тіло – газ; $\sigma_{1,2}$ – та тверде тіло – рідина. Поверхневий натяг діє вздовж дотичної до відповідної поверхні σ і розташовується під певним кутом до площини контакту. Цей кут називають краєвим кутом змочування. Позначимо величину кута крайового змочування через букву θ.

Роботу адгезії W_a рідини можна визначити за допомогою рівняння Дюпре-Юнга, взявши за основу експериментально виміряний крайовий кут змочування θ [25]:

$$W_a = \sigma(1 + \cos\theta). \tag{3}$$

Під час роботи лопаті у повітряному потоці виникає взаємодія між твердою поверхнею та повітрям. Для наочного вивчення впливу електростатичних сил розглянемо взаємодію між твердою поверхнею та рідиною. Зокрема, звернемо увагу на явище змочування, що виникає під час контакту рідини з твердим тілом внаслідок молекулярної взаємодії.

Відомо, що змочування проявляється в розтіканні краплі рідини по поверхні твердого тіла. Процес розтікання рідини на твердій поверхні відрізняється від її розтікання на поверхні рідин, яке визначається молекулярною рухливістю. На твердих поверхнях рідини розтікаються внаслідок таких процесів, як дифузія, капілярність, летючість рідини тощо. Якщо молекули рідини сильніше взаємодіють із молекулами твердої поверхні, ніж між собою, рідина розтікається по цій поверхні, тобто змочує її. Процес продовжується, доки рідина не вкриє всю поверхню твердого діла. Це явище відоме як повне змочування.

Якщо ж молекули рідини взаємодіють одна з одною значно сильніше, ніж із молекулами твердої поверхні, розтікання не відбувається – рідина збирається в краплю. Інакше кажучи, якщо сили відштовхування між молекулами твердої поверхні переважають сили притягання між молекулами рідини, то вода не розтікається, а утворює краплі.

Між цими крайніми випадками існують проміжні, коли змочування є частковим. У такій ситуації крапля формує на твердій поверхні певний рівноважний кут, що називається краєвим кутом або кутом змочування θ.

Краєвий кут θ визначається як кут між дотичною до поверхні краплі та твердою поверхнею. Менший кут θ свідчить про краще змочування поверхні рідиною. Відповідно, чим більший кут θ, тим гірше змочування, і тим сильніше проявляються електростатичні сили, які створюють відштовхування між диполями рідини та твердого тіла. На рисунку 2 наведено вигляд поверхні краплі води, що розміщується на поверхні твердого тіла

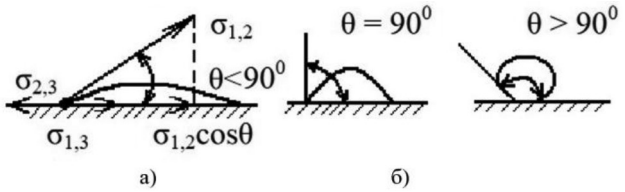


Рис. 2. Вигляд краплі води на поверхні твердого тіла у випадку: змочування (а) і незмочування (б) поверхні твердого тіла

Відповідно, на одиниці довжини периметра змочування діють три сили Б1,2; Б2,3 і Б1,3. Тоді умова рівноваги сил, яка виражається рівнянням Юнга, матиме вигляд [25]:

$$\sigma_{2,3} = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2} \cos\theta. \quad (4)$$

Звідси

$$cos\theta = \frac{\sigma_{2,3} - \sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}}. \quad (5)$$

Величину cos θ яка характеризує здатність рідини змочувати поверхню, називають змочуванням та позначають через В. При повному змочуванні θ = 00, *B* = +1, при повному незмочуванні θ = 1800, *B* = –1.

Серед двох рідин краще змочує тверду поверхню та інтенсивніше розтікається та, для якої зменшення поверхневої енергії системи є найбільшим. Це означає, що змочування твердої поверхні рідиною можливе лише за умови, що поверхневий натяг на межі розділу тверде тіло – рідина $\sigma_{1,2}$ є меншим, ніж поверхневий натяг між твердим тілом і газовою фазою σ_{13}. Якщо ця умова не виконується, рідина не зможе змочувати тверду поверхню, оскільки її молекули будуть більше притягуватися одна до одної, ніж до молекул твердої поверхні.

Крім того, міцність контакту між рідиною (адгезивом) і твердим тілом (субстратом) залежить від їхньої полярності. Чим ближчі вони за полярністю, тим сильнішими будуть міжмолекулярні взаємодії між ними, що сприятиме кращому змочуванню та збільшенню адгезійної міцності. Це особливо важливо у технологіях склеювання, фарбування, нанесення покриттів і створення полімерних композиційних матеріалів.

У випадку коли ми розглядаємо поверхню повітряного гвинта де існує контакт між твердою поверхнею і повітрям нам необхідно мати як найменшу міцність цього контакту. Іншими словами можна сказати, що нам необхідно мати незмочування поверхні твердого тіла рідиною. Ця умова необхідна для зменшення втрат енергії на тертя, між твердою поверхнею гвинта та повітрям, при роботі повітряного гвинта.

Електрична теорія адгезії пов'язує явище адгезії з формуванням подвійного електричного шару на межі контакту між адгезивом і субстратом. Цей шар виникає внаслідок різниці в зарядах між двома матеріалами, що контактують. А це впливає на міцність та властивості зв'язку.

Щоб визначити роботу адгезії, часто використовують непрямі методи, які дозволяють оцінити сили, що діють на межі розділу фаз. Ці методи особливо ефективні, коли хоча б одна з фаз є рідиною, оскільки це дозволяє вимірювати такі фізичні параметри, як краєвий кут змочування θ. Краєвий кут змочування характеризує здатність рідини взаємодіяти з поверхнею твердого тіла, і може служити індикатором сили адгезії. Вимірювання цього кута дає можливість отримати важливу інформацію про ефективність зчеплення між матеріалами та, відповідно, оцінити роботу адгезії.

Роботу адгезії можна оцінити за допомогою непрямих методів, що є особливо корисними, коли хоча б одна з фаз взаємодії перебуває у рідкому стані. Це відкриває можливість для точних вимірювань, таких як краєвий кут змочування θ, який є важливим показником взаємодії рідини з поверхнею твердого матеріалу. Краєвий кут змочування відображає, наскільки добре рідина розтікається по поверхні, що, в свою чергу, залежить від сили адгезії між рідиною та матеріалом. Чим менший цей кут, тим сильніше адгезія, оскільки рідина має більшу здатність до «прилипанню» до поверхні.

Вимірювання краєвого кута змочування дозволяє не лише оцінити взаємодію між матеріалами, а й розрахувати роботу адгезії, що є критично важливим для багатьох технологічних процесів де у нашому випадку є покриття повітряного гвинта.

Згідно даних літературних джерел [25, 26] змочуваність деяких твердих тіл водою характеризується такими краєвими кутами: кварц – 00, малахіт – 170, графіт – 550, тальк – 690, парафін – 1060, тефлон – 1080. Найбільшими краєвими кутами володіє тефлон та парафін, які мають кращі водовідштовхувальні властивості. Для підтвердження теоретичних положень можливості зменшення притягання молекулами твердої речовини своєю поверхнею рідини або газу, а отже і зменшення лобового опору повітряним гвинтом, було проведено експериментальні дослідження.

Для проведення експериментальних досліджень впливу електростатичного водовідштовхувального покриття лопатей повітряного гвинта було виготовлено моноблочний повітряний гвинт діаметром 125 см та кроком 57 см. Матеріалом, з якого виготовлявся гвинт, були дошки із сосни. Розміри бруска для виготовлення гвинта взято розміром 12 см × 5 см. Брусок склеювався із декількох дошок для надання механічної міцності гвинту. Розрахунок параметрів повітряного гвинта для дослідної гвинтомоторної установки здійснювався за [28].

Окремі ділянки гвинта, зокрема закінцівки лопатей, передня кромка в районі закінцівки, поверхня маточини, а також отвори під болти та центральний отвір, потребують підвищеної міцності та твердості, оскільки зазнають значних механічних навантажень під час експлуатації. Для зміцнення цих зон використовувався універсальний водостійкий клей, що дозволяє підвищити зносостійкість і запобігти передчасному руйнуванню матеріалу. У процесі затягування болтів, що використовуються для кріплення гвинта, можливе деформування поверхні маточини через надмірний тиск. Крім того, передня кромка лопаті може зазнавати пошкоджень у разі контакту з травою, дрібним камінням або іншими матеріалами під час роботи гвинта.

Щоб уникнути таких проблем, перед нанесенням клею поверхня гвинта піддавалась ретельно шліфуванню, забезпечуючи рівномірний розподіл захисного шару. Завдяки своїй рідкій консистенції, клей ефективно проникає в структуру деревини, просочуючи її на глибину від 0,5 до 1 мм залежно від породи дерева. Це дозволяє значно підвищити твердість поверхневого шару, покращуючи його стійкість до механічних пошкоджень, стирання та впливу зовнішніх факторів.

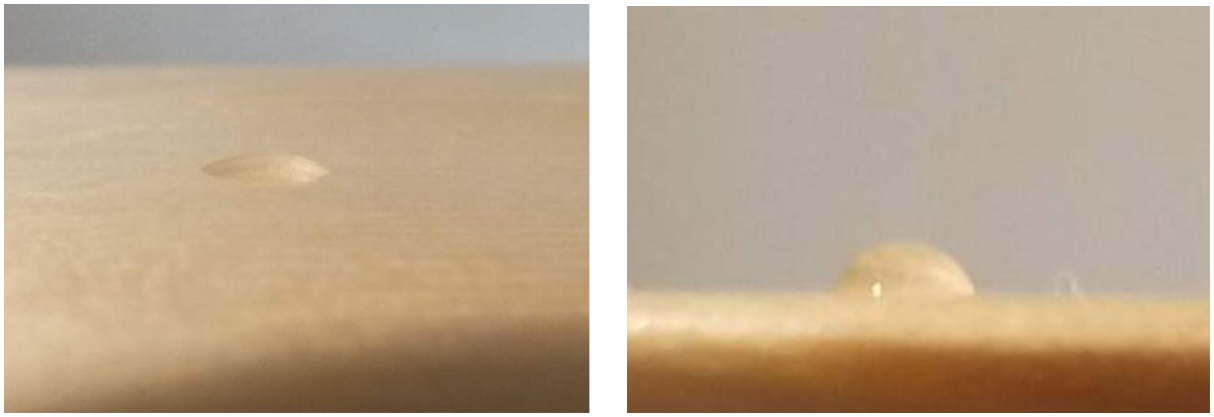
Для зовнішнього покриття поверхні повітряного гвинта використано двокомпонентний поліуретановий лак. Важливо добавляти оптимальну кількість затверджувача, оскільки порушення пропорції спричинить збільшення тривалості висихання лаку. Розхід лаку на одну лопать гвинта діаметром 125 см на один шар покриття склав 20 г. Лак наносився двома шарами з витримкою часу для висихання попереднього шару.

Для оцінки впливу на економічні та тягові показники сконструйованого гвинта з лаковим покриттям та електростатичним водовідштовхувальним покриттям проведено експериментальні дослідження роботи в реальних умовах на парамоторній установці із двигуном Solo 210. Потужність двигуна 14 к.с. Згідно паспортних даних, максимальні оберти даного двигуна – 6200 об/хв. Редуктор 2,5. Крило українського виробника Sky-Country Moscito-4. Площа крила 27,5 м^2. Зовнішній вигляд парамоторної установки показано на рисунку 3.



Рис. 3. Зовнішній вигляд парамоторної установки з повітряним гвинтом 125 × 57

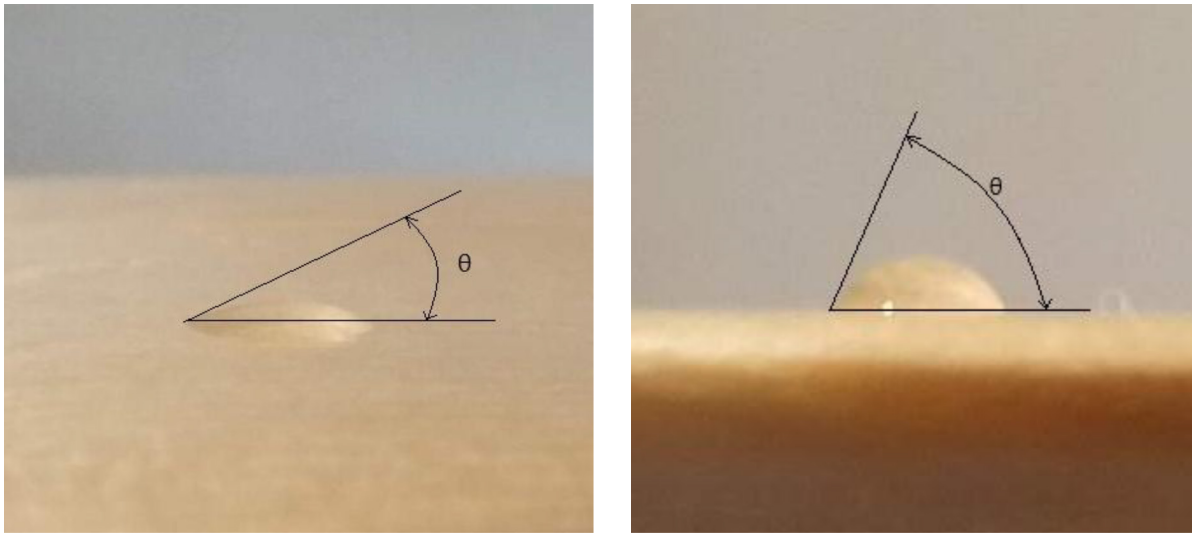
Первинні експериментальні дослідження проводились із гвинтом на який нанесено тільки лакове покриття. Економічні і тягові показники парамоторної установки знято і записано впродовж 5 годинного нальоту. Результати експериментальних досліджень роботи повітряного гвинта з лаковим покриттям його поверхні представлено в таблиці 1. Після проведення первинних випробувань повітряний гвинт знято з парамоторної установки та на його поверхню нанесено краплю води для оцінки поверхневого натягу на лаковому покритті гвинта. Фото вигляду краплі води на поверхні повітряного гвинта показано на рисунку 4, *а*. Наступні дослідження проводились при нанесенні на поверхню гвинта електростатичного водовідштовхувального покриття. Фото виду краплі води на поверхні повітряного гвинта з електростатичним водовідштовхувальним покриттям показано на рисунку 4, *б*.



а ***б***

Рис. 4. Крапля води нанесена на поверхню лопаті: з лаковим покриттям (*а*); з електростатичним водовідштовхувальним покриттям (*б*)

Для наочного зображення краєвого кута змочування θ нанесемо дотичні лінії до поверхонь краплі води для двох варіантів поверхні повітряного гвинта – з лаковим покриттям і поверхні гвинта з електростатичним водовідштовхувальним покриттям. Нанесені дотичні лінії до поверхонь краплі води для відображення краєвого кута змочування θ зображено на рисунку 5.



а ***б***

Рис. 5. Крапля води нанесена на поверхню лопаті: з лаковим покриттям (*а*); з електростатичним водовідштовхувальним покриттям (*б*)

Як видно з рисунка 5, на поверхні повітряного гвинта з лаковим покриттям краєвий кут змочування поверхні θ складає 300, а на поверхні повітряного гвинта з електростатичним водовідштовхувальним покриттям, краєвий кут змочування поверхні θ складає 700.

Для оцінки впливу властивостей поверхні повітряного гвинта, а саме зменшення його лобового опору повітряному потоку, проведено повторні експериментальні дослідження з повітряним гвинтом на поверхню якого

нанесено електростатичне водовідштовхувальне покриття. Впродовж 5 годинного нальоту знімались і записувались економічні та тягові показники парамоторної установки. Результати експериментальних досліджень роботи повітряного гвинта з двома різними типами покриттів його поверхні занесено в таблицю 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень роботи повітряного гвинта з двома різними покриттями його поверхні

Показники	Гвинт 125 × 57 Поверхня повітряного гвинта з лаковим покриттям	Гвинт 125 ×57 Поверхня повітряного гвинта з електростатичним водовідштовхувальним покриттям
Краєвий кут змочування поверхні повітряного гвинта, θ, °	30	70
Збільшення краєвого кута змочування поверхні повітряного гвинта, θ, °	0	40
Максимальні обороти двигуна на місці, об/хв	6030…6050	6130…6150
Збільшення максимальних оборотів двигуна на місці, %	0	1,67
Максимальні обороти двигуна в польоті, 43…45 км/год (набір висоти), об/хв	5970…6000	6010…6030
Обороти двигуна в крейсерському режимі польоту, об/хв	5200…5400	5200…5400
Тяга на місці, кг	42…44	43…45
Збільшення тяги гвинта, %	0	3,7…4
Висота польоту, м	100…150	100…150
Вага пілота, кг	93	93
Вага парамоторної установки, кг	23	23
Температура повітря, °С	20	20
Розхід палива за 1 год маршрутного польоту, л	3…3,15	2,8…2,9
Економія палива, %	0	4…6

Обробка поверхні повітряного гвинта електростатичним водовідштовхувальним покриттям за запропонованою методикою показали збільшення максимальних оборотів двигуна при роботі гвинтомоторної установки на місці та у польоті. Згідно проведених досліджень, використання електростатичного водовідштовхувального покриття дозволяє знизити розхід палива на 4…6 %.

Висновки

Застосування електростатичного водовідштовхувального покриття лопатей повітряного гвинта сприяє підвищенню його аеродинамічних властивостей та підвищенню ефективності функціонування гвинтомоторної групи.

Розроблена методика оцінки електростатичних водовідштовхувальних властивостей матеріалу базується на використанні явищ водовідштовхування через аналіз його кута крайового змочування.

Дослідження за цією методикою було проведено на парамоторній установці з двигуном Solo 210 (14 к.с.) та крилом Moscito-4, як у польотному режимі, так і при роботі на місці.

Експериментальні результати показали, що нанесення електростатичного водовідштовхувального покриття на лопаті повітряного гвинта дозволяє досягти збільшення тяги на 4 %, знизити лобовий опір та покращити паливно-економічні показники гвинтомоторної установки, зокрема зменшити витрату палива на 4–6 %.

Список використаної літератури

1. Rizzi, A & Oppelstrup, J 2021, “Introduction to Aircraft Aerodynamic Design”, in Cambridge University Press eBooks, pp. 1–44, https://doi.org/10.1017/9781139094672.003.

2. Lukianov, P & Dusheba, O 2023, “Modeling of aerodynamic noise of quadrotor type aerotaxi”, Aerospace Technic and Technology, (4):38–49, https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4.05.

3. Cummings, RM & Bertin, JJ 2021, Aerodynamics for engineers. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009105842

4. Zhornik, O, Kravchenko, I, Mitrakhovych, M & Balalaieva, K 2022, “Comparative evaluation of the efficiency of the ring-type and bucket inlet devicesfor a power plant with a turbopropfan engine”, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1(118)):6–12, https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263023

5. Hoyos, JD, Alvarado, JP & Jiménez, JH 2021, “Propeller aerodynamic optimisation to minimise energy consumption for electric fixed-wing aircraft”, The Aeronautical Journal, 125(1292):1844–1870, https://doi.org/10.1017/aer.2021.51

6. Hoyos, J, Jímenez, JH, Echavarría, C & Alvarado, JP 2021, “Airfoil Shape Optimization: Comparative Study of Meta-heuristic Algorithms, Airfoil Parameterization Methods and Reynolds Number Impact”, IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 1154(1):012016, https://doi.org/10.1088/1757-899x/1154/1/012016

7. Mian, HH, Wang, G, Zhou, H & Wu, X 2021, "Optimization of thin electric propeller using physics-based surrogate model with space mapping", Aerospace Science and Technology, 111106563, https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106563

8. Khomiak, E., Burdeina, V., Cherniak, O., Olesia, N., Bubela, T. (2024). Improving the Method of Quality Control of the Fuel Element Shell in Order to Improve the Safety of a Nuclear Reactor. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Krytskyi, D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023. ICTM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1008. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_30

9. Khomiak, E., Trishch, R., Zabolotnyi, O., Cherniak, O., Lutai, L., Katrich, O. (2024). Automated Mode of Improvement of the Quality Control System for Nuclear Reactor Fuel Element Shell Tightness. In: Faure, E., et al. Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 221. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_7

10. Hussain, M, Abdel-Nasser, Y, Banawan, A & Ahmed, Y M 2020, "FSI-based structural optimization of thin bladed composite propellers", in Alexandria Engineering Journal, vol. 59, no. 5, pp. 3755–3766, https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.032

11. Bhat, A, Budholiya, S, Aravind Raj, S, Sultan, M T H, Hui, D, Md Shah, A U & Safri, S N A 2021, "Review on nanocomposites based on aerospace applications", in Nanotechnology Reviews, vol. 10, no. 1, pp. 237–253, https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0018

12. Rashid, A B, Haque, M, Islam, S M M & Uddin Labib, K M R 2024, "Nanotechnology-enhanced fiber-reinforced polymer composites: Recent advancements on processing techniques and applications", in Heliyon, vol. 10, no. 2, e24692, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24692

13. Trishch, R, Cherniak, O, Zdenek, D & Petraskevicius, V 2024, "Assessment of the occupational health and safety management system by qualimetric methods", in Engineering Management in Production and Services, vol. 16, no. 2, pp. 118–127, https://doi.org/10.2478/emj-2024-0017

14. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, "Assessment of safety risks using qualimetric methods", in MM Science Journal, 2023(3), https://doi.org/10.17973/mmsj.2023_10_2023021

15. Cherniak, O, Trishch, R, Ginevičius, R, Nechuiviter, O & Burdeina, V 2024, "Methodology for Assessing the Processes of the Occupational Safety Management System Using Functional Dependencies", in Lecture notes in networks and systems, pp. 3–13, https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_1

16. Adkins, C N & Liebeck, R H 1994, "Design of optimum propellers", in Journal of Propulsion and Power, vol. 10, no. 5, pp. 676–682, https://doi.org/10.2514/3.23779

17. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, "Assessment of safety risks using qualimetric methods", in MM Science Journal, 2023(3), https://doi.org/10.17973/mmsj.2023_10_2023021

18. Cherniak, O, Trishch, R, Ginevičius, R, Nechuiviter, O & Burdeina, V 2024, "Methodology for Assessing the Processes of the Occupational Safety Management System Using Functional Dependencies", in Lecture notes in networks and systems, pp. 3–13, https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_1

19. Labs of Latvia 2021, Nanocoatings for the New Generation of Aviation Engine Parts Developed by RTU, https://labsoflatvia.com/en/news/nanocoatings-for-the-new-generation-of-aviation-engine-parts-developed-by-rtu

20. Gu, Y, Xia, K, Wu, D, Mou, J & Zheng, S 2020, "Technical Characteristics and Wear-Resistant Mechanism of Nano Coatings: A Review", Coatings, 10(3):233, https://doi.org/10.3390/coatings10030233

21. Kiesel, L 2021, "Advanced air plasma spray TBCs for aerospace and industrial components", in Honeywell Aerospace Technologies, https://aerospace.honeywell.com/us/en/learn/about-us/blogs/advanced-air-plasma-spray-tbcs

22. Kobayakawa, M & Onuma, H 1985, "Propeller aerodynamic performance by vortex-lattice method", in Journal of Aircraft, vol. 22, no. 8, pp. 649–654, https://doi.org/10.2514/3.45181

23. Lopez, N R 2020, "Resistant project: How can nanotechnology reduce environmental impacts of aircrafts?" in Open Access Government, https://www.openaccessgovernment.org/nanotechnology-reduce-environmental-impacts-of-aircrafts/85311

24. Firoozi, A., Hejazi, F., & Firoozi, A. (2024). Advancing Wind Energy Efficiency: A Systematic Review of Aerodynamic Optimization in Wind Turbine Blade Design. Energies. https://doi.org/10.3390/en17122919

25. Демченко, В. І. Колоїдна хімія. Київ: Вища школа, 2008.

26. 2Мчедлов-Петросян М. О., Лебідь В. І., Глазкова О. М., Лебідь О. В. Колоїдна хімія : підручн. за ред. проф. М. О. Мчедлова-Петросяна. 2-ге вид., випр. і доп. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2012. 500 с.

27. Адгезія і когезія. Явища розтікання та змочування. Лекція. https://chemeducation.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/14/2020/02/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F_3_%D0%90%D0%B4%D0%B3%D0%B5%D0%B7%D1%96%D1%8F.pdf

28. Соловей І. М. Проектування та технологія виготовлення повітряних гвинтів. Монографія. Бережани, Дніпро : Середняк Т. К. 2025. 166 с.

References

1. Rizzi, A & Oppelstrup, J 2021, "Introduction to Aircraft Aerodynamic Design", in Cambridge University Press eBooks, pp. 1–44, https://doi.org/10.1017/9781139094672.003

2. Lukianov, P & Dusheba, O 2023, "Modeling of aerodynamic noise of quadrotor type aerotaxi", Aerospace Technic and Technology, (4):38–49, https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4.05

3. Cummings, RM & Bertin, JJ 2021, Aerodynamics for engineers. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009105842

4. Zhornik, O, Kravchenko, I, Mitrakhovych, M & Balalaieva, K 2022, "Comparative evaluation of the efficiency of the ring-type and bucket inlet devicesfor a power plant with a turbopropfan engine", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1 (118)):6–12, https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263023

5. Hoyos, JD, Alvarado, JP & Jiménez, JH 2021, "Propeller aerodynamic optimisation to minimise energy consumption for electric fixed-wing aircraft," The Aeronautical Journal, 125(1292):1844–1870, https://doi.org/10.1017/aer.2021.51

6. Hoyos, J, Jímenez, JH, Echavarría, C & Alvarado, JP 2021, "Airfoil Shape Optimization: Comparative Study of Meta-heuristic Algorithms, Airfoil Parameterization Methods and Reynolds Number Impact", IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 1154(1):012016, https://doi.org/10.1088/1757-899x/1154/1/012016

7. Mian, HH, Wang, G, Zhou, H & Wu, X 2021, "Optimization of thin electric propeller using physics-based surrogate model with space mapping", Aerospace Science and Technology, 111106563, https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106563

8. Khomiak, E., Burdeina, V., Cherniak, O., Olesia, N., Bubela, T. (2024). Improving the Method of Quality Control of the Fuel Element Shell in Order to Improve the Safety of a Nuclear Reactor. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Krytskyi, D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023. ICTM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1008. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_30

9. Khomiak, E., Trishch, R., Zabolotnyi, O., Cherniak, O., Lutai, L., Katrich, O. (2024). Automated Mode of Improvement of the Quality Control System for Nuclear Reactor Fuel Element Shell Tightness. In: Faure, E., et al. Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 221. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_7

10. Hussain, M, Abdel-Nasser, Y, Banawan, A & Ahmed, Y M 2020, "FSI-based structural optimization of thin bladed composite propellers", in Alexandria Engineering Journal, vol. 59, no. 5, pp. 3755–3766, https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.032

11. Bhat, A, Budholiya, S, Aravind Raj, S, Sultan, M T H, Hui, D, Md Shah, A U & Safri, S N A 2021, "Review on nanocomposites based on aerospace applications", in Nanotechnology Reviews, vol. 10, no. 1, pp. 237–253, https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0018

12. Rashid, A B, Haque, M, Islam, S M M & Uddin Labib, K M R 2024, "Nanotechnology-enhanced fiber-reinforced polymer composites: Recent advancements on processing techniques and applications", in Heliyon, vol. 10, no. 2, e24692, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24692

13. Trishch, R, Cherniak, O, Zdenek, D & Petraskevicius, V 2024, "Assessment of the occupational health and safety management system by qualimetric methods", in Engineering Management in Production and Services, vol. 16, no. 2, pp. 118–127, https://doi.org/10.2478/emj-2024-0017

14. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, "Assessment of safety risks using qualimetric methods", in MM Science Journal, 2023(3), https://doi.org/10.17973/mmsj.2023_10_2023021

15. Cherniak, O, Trishch, R, Ginevičius, R, Nechuiviter, O & Burdeina, V 2024, "Methodology for Assessing the Processes of the Occupational Safety Management System Using Functional Dependencies", in Lecture notes in networks and systems, pp. 3–13, https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_1

16. Adkins, C N & Liebeck, R H 1994, "Design of optimum propellers", in Journal of Propulsion and Power, vol. 10, no. 5, pp. 676–682, https://doi.org/10.2514/3.23779

17. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, "Assessment of safety risks using qualimetric methods", in MM Science Journal, 2023(3), https://doi.org/10.17973/mmsj.2023_10_2023021

18. Cherniak, O, Trishch, R, Ginevičius, R, Nechuiviter, O & Burdeina, V 2024, "Methodology for Assessing the Processes of the Occupational Safety Management System Using Functional Dependencies", in Lecture notes in networks and systems, pp. 3–13, https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_1

19. Labs of Latvia 2021, Nanocoatings for the New Generation of Aviation Engine Parts Developed by RTU, https://labsoflatvia.com/en/news/nanocoatings-for-the-new-generation-of-aviation-engine-parts-developed-by-rtu

20. Gu, Y, Xia, K, Wu, D, Mou, J & Zheng, S 2020, "Technical Characteristics and Wear-Resistant Mechanism of Nano Coatings: A Review", Coatings, 10(3):233, https://doi.org/10.3390/coatings10030233

21. Kiesel, L 2021, "Advanced air plasma spray TBCs for aerospace and industrial components", in Honeywell Aerospace Technologies, https://aerospace.honeywell.com/us/en/learn/about-us/blogs/advanced-air-plasma-spray-tbcs

22. Kobayakawa, M & Onuma, H 1985, “Propeller aerodynamic performance by vortex-lattice method”, in Journal of Aircraft, vol. 22, no. 8, pp. 649–654, https://doi.org/10.2514/3.45181

23. Lopez, N R 2020, “Resistant project: How can nanotechnology reduce environmental impacts of aircrafts?” in Open Access Government, https://www.openaccessgovernment.org/nanotechnology-reduce-environmental-impacts-of-aircrafts/85311

24. Firoozi, A., Hejazi, F., & Firoozi, A. (2024). Advancing Wind Energy Efficiency: A Systematic Review of Aerodynamic Optimization in Wind Turbine Blade Design. Energies. https://doi.org/10.3390/en17122919

25. Demchenko, V. I. (2008). Koloidna khimiia [Colloidal chemistry]. Kyiv : Vyshcha shkola. [in Ukrainian].

26. Mchedlov-Petrosian M. O., Lebid V. I., Hlazkova O. M., Lebid O. V. (2012) Koloidna khimiia : pidruchn. [Colloidal chemistry] za red. prof. M. O. Mchedlova-Petrosiana. 2-he vyd., vypr. i dop. Kharkiv : KhNU im. V. N. Karazina – Kharkiv : V. N. Karazin Kharkiv National University. 500 s. [in Ukrainian].

27. Adheziia i koheziia. Yavyshcha roztikannia ta zmochuvannia. Lektsiia [Adhesion and cohesion. Phenomena of spreading and wetting. Lecture] https://chemeducation.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/14/2020/02/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F_3_%D0%90%D0%B4%D0%B3%D0%B5%D0%B7%D1%96%D1%8F.pdf [in Ukrainian].

28. Solovei I. M. (2025) Proektuvannia ta tekhnolohiia vyhotovlennia povitrianykh hvyntiv [Design and manufacturing technology of propellers. Monograph]. Monohrafiia. Berezhany, Dnipro : Seredniak T. K., 166 s. [in Ukrainian].

УДК 629.017 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.34

О. В. СТЕПАНОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри тракторів і автомобілів
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: 0000-0003-4954-2532

СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ЗНИЖЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ГАЛЬМІВНИХ МОМЕНТІВ НА КОЛЕСАХ ОДНІЄЇ ВІСІ АВТОМОБІЛЯ

Стаття присвячена вирішенню актуальній задачі впровадження систем автоматичного зниження нерівномірності гальмівних моментів на колесах однієї вісі автомобіля для поліпшення курсової стійкості автомобіля при гальмуванні. Автор аналізує наявні конструкції гальмівних систем автомобіля, визначаючи основні проблеми, які потребують вирішення. У статті представлено принцип роботи розробленої системи автоматичного зниження нерівномірності гальмівних моментів на колесах однієї вісі автомобіля, а також гальмівний механізм з мехатронним модулем, який, на відміну від гідравлічного гальмівного механізму, покращує курсову стійкість автомобіля під час гальмування.

Мехатронний модуль діє як резервний контур у гальмівній системі під час екстреного гальмування, забезпечуючи додаткову безпеку в екстрених ситуаціях. Він також діє як надійне стоянкове гальмо, працюючи з протиугінними системами, що підвищує захист автомобіля від несанкціонованого руху. Крім того, мехатронний модуль дозволяє проводити функціональну діагностику, дозволяє контролювати стан гальмівної системи та оперативно виявлятиь несправності. Мехатронний модуль допомагає підтримувати високу ефективність роботи та забезпечує підвищений рівень безпеки під час експлуатації.

Запропонована система автоматичного вирівнювання гальмівних моментів відрізняється від відомих альтернативним рішенням, що забезпечує підтримку курсової стійкості при гальмуванні, а завдяки високій швидкодії мехатронного модуля в гальмівному механізмі зменшується час гальмування і довжина гальмівного шляху. Це дозволяє покращити керованість і стійкість автомобіля, відкриваючи перспективи для створення гальмівних систем нового покоління.

Ключові слова: *гальмівний механізм, гальмівна система, система автоматичного зниження, мехатронний модуль, швидкодія гальмівного механізму, курсова стійкість автомобіля.*

O. V. STEPANOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Tractors and Cars
National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine
ORCID: 0000-0003-4954-2532

SYSTEM OF AUTOMATIC REDUCTION OF UNEVEN BRAKING TORQUES ON THE WHEELS OF ONE VEHICLE AXLE

The article is devoted to solving the urgent problem of implementing a system for automatically reducing the unevenness of braking torques on the wheels of one vehicle axle to improve the vehicle directional stability during braking. The author analyzes the existing designs of vehicle braking systems, identifying the main problems that need to be solved. The paper presents the principle of operation of the developed system for automatically reducing the unevenness of braking torques on the wheels of one vehicle axle, as well as a brake mechanism with a mechatronic module, which, unlike the hydraulic brake mechanism, improves vehicle directional stability during braking.

The mechatronic module acts as a backup circuit in the brake system during emergency braking, providing additional safety in emergencies. It also acts as a reliable parking brake, working with anti-theft systems, which increases the protection of the car from unauthorized movement. In addition, the mechatronic module allows for functional diagnostics, allows you to monitor the condition of the brake system and promptly detect malfunctions. The mechatronic module helps maintain high efficiency and provides an increased level of safety during operation.

The proposed system of automatic brake torque equalization differs from the known alternative solutions, which ensures the maintenance of directional stability during braking, and due to the high speed of the mechatronic module in the braking mechanism, the braking time and stopping distance are reduced. This improves vehicle handling and stability, opening up prospects for the development of braking systems of a new generation.

Key words: *brake mechanism, brake system, automatic reduction system, mechatronic module, brake mechanism performance, vehicle directional stability.*

Постановка проблеми

Зростання щільності та швидкості руху автотранспорту на автомобільних шляхах України спричинило необхідність посилення вимог до безпеки дорожнього руху (БДР) [2, 5]. Це передбачає вдосконалення гальмівних характеристик автомобілів через проведення параметричної та структурної оптимізації їх конструкцій, а також запровадження новітніх та ефективних рішень. Одним із важливих аспектів є стабільність моментів, які утворюються гальмівними системами. Вони безпосередньо впливають на зменшення гальмівного шляху та покращенню стійкості автомобіля в процесі гальмування.

Нерівномірний розподіл гальмівних зусиль між колесами з різних сторін автомобіля може викликати виникнення додаткових моментів, які здатні обертати автомобіль у площині дороги. Це призводить до ускладнення керування автомобілем, знижує ефективність гальмування та може спричинити втрату курсової стійкості. У результаті таких явищ значно підвищується ризик виникнення дорожньо-транспортних пригод (ДТП), особливо на високих швидкостях.

Відповідно до цього, важливість удосконалення конструкцій автомобільних гальмівних систем та підвищення рівня БДР стає ще більш очевидною. Проблема вимагає поглибленого дослідження та використання інноваційних технологій у конструкціях автомобілів, що сприятимуть зниженню кількості ДТП, забезпеченню надійності й стабільності гальмування при високих швидкостях руху та підвищення безпеки на дорогах України. Враховуючи ці фактори тема дослідження набуває особливої актуальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Категорія безпеки автотранспорту в системі БДР у науковій літературі розглядається у різних аспектах. При цьому динаміка та ефективність гальмування є найважливішими характеристиками автотранспортних засобів (АТЗ). Найбільші закордонні виробники гальмівних систем, такі як Bosch, WABCO, Knorr-Bremse, Haldex, Bendix, Lucas Industries, AlliedSignal Truck Brake Systems й інші застосовують різні технології, щоб забезпечити мінімальний гальмівний шлях у будь-яких дорожніх умовах, одночасно зберігаючи стійкість та керованість АТЗ. Для зменшення ДТП були розроблені електронні системи керування, які без участі водія оптимізують гальмівні характеристики та поведінку АТЗ. Зокрема, розроблені та впроваджені системи активної безпеки АТЗ, такі як антиблокувальна система (ABS), електронний розподіл гальмівних сил (EBD), система курсової стійкості (ESP), система динамічної стійкості (RSP), протибуксувальна система (DSC, TCS або ASR), а також система адаптивного регулювання швидкості (АРС), що засновані на електронному управлінні агрегатами та системами [15–19]. При цьому найбільш перспективним напрямком для вдосконалення гальмівних систем АТЗ є інтеграція електропневматичного гальмівного приводу та систем ABS і DSC в єдину керівну систему, що використовує загальні датчики, модулятори й електронний блок управління. Отже, система ABS на сучасному етапі розвитку гальмівних систем стала повноправною частиною робочої гальмівної системи АТЗ.

Питаннями розробки, дослідження робочих процесів, оцінки параметричної надійності та визначення зон застосування різних типів робочих гальмівних систем (РТС) у різні часи займалися А. Б. Абрамов, И. М. Бендас, Л. А. Бігунов, В. А. Богомолов, Г. В. Борисенко, Л. Л. Борисов, А. С. Бриков, А. А. Великанов, В. П. Волков, А. Б. Гредескул, Б. Б. Генбом, Е. М. Гецович, В. А. Демьянюк, Г. М. Косолапов, О. П. Кравченко, А. Т. Лебедев, М. А. Подригало, Е. А. Романчук, А. Н. Туренко, А. С. Федосов, E. Kroemer, H. Geupel, L. Segel, R. Mortimer, G. A. Fazekas [2–25] й ін. У роботах показано, що РТС побудовані за принципом розімкнутої автоматичної системи регулювання тиску у виконавчих механізмах гальмівного приводу залежно від динамічного перерозподілу зчіпної ваги між колесами АТЗ [3, 4, 6, 7, 12, 13, 14].

Крім того, проблема забезпечення курсової стійкості нерозривно пов'язана зі збереженням необхідної ефективності гальмування. У дослідженнях проф. М. А. Подриґало (Україна) й ін. [7–10] доведено, що стійкість, керованість та ефективність гальмування є показниками, що характеризують здатність АТЗ зберігати курсову стійкість при гальмуванні, що визначається як характером зчіпних властивостей коліс із дорогою, так і можливостями гальмівної системи. При цьому основними показниками ефективності гальмівної системи є довжина гальмівного шляху та сповільнення АТЗ. Для різних типів АТЗ встановлені нормативи початкової швидкості гальмування та довжина гальмівного шляху сповільнення АТЗ.

З'ясовано, що значна кількість дорожньо-транспортних пригод (ДТП) відбувається через людський фактор, особливо в екстрених ситуаціях, коли водієві важко врахувати всі обставини, такі як навантаження АТЗ або нерівномірне зчеплення з дорогою. Причини цього криються в особливостях водіння АТЗ у різних умовах, підвищенні інтенсивності та швидкості дорожнього руху, що вимагає від водія постійної емоційної та фізичної напруги. В екстремальних ситуаціях водієві складно врахувати безліч факторів, таких як завантаження АТЗ, нерівномірне зчеплення коліс із дорогою, стан систем та окремих агрегатів.

Крім того, нестабільність розподілу гальмівних сил між колесами однієї вісі АТЗ призводить до появи моменту, що повертає, і занесення АТЗ. Це зумовлює пошук ефективних засобів забезпечення гальмівної динаміки та необхідність розробки систем, що дозволяють автоматично знижувати нерівномірність гальмівних моментів на колесах однієї вісі АТЗ. Тобто розробка гальмівної системи, яка б запобігала ДТП, залишається важливим і актуальним завданням.

Формулювання мети дослідження

Розглянути систему автоматичного зниження нерівномірності гальмівних моментів на колесах однієї вісі автомобіля для поліпшення курсової стійкості автомобіля при гальмуванні.

Викладення основного матеріалу дослідження

З метою покращення безпеки автотранспорту та БДР слід дослідити системи, які можуть або усунути надмірну дію керування, або скоригувати недостатні дії водія за допомогою системи активної безпеки автомобіля.

Розглянемо концепцію системи автоматичного зниження нерівномірності гальмівних моментів на колесах однієї вісі автомобіля (далі – Система), яка побудована на основі гальмівної системи з дисковими гальмами підвищеної стабільності [7] з деякими доопрацюваннями. У магістраль управління дискових гальм однієї вісі автомобіля встановлений чотириходовий золотниковий розподільник, що пружний з двох сторін. Пружні торцеві порожнини золотникового розподільника з'єднані зі штоковими порожнинами опорних циліндрів відповідних дискових гальм, а внутрішні порожнини золотника пов'язані з додатковим робочим циліндром, встановленим у скобі супорта. Схема Системи зображена на рис. 1.

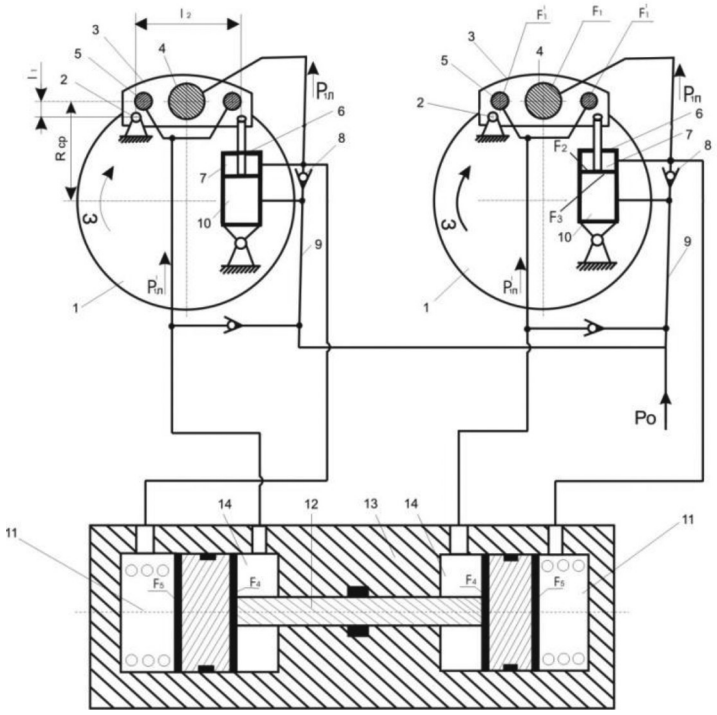


Рис. 1. Схема гідравлічної системи автоматичного зниження нерівномірності гальмівних моментів на одній вісі автомобіля

Гальмівна система автомобіля включає дискові гальма, кожен з яких містить гальмівний диск 1, поворотну навколо циліндричного шарніра 2 скобу 3 з розташованими в ній гальмівними робочими циліндрами 4 і додатковими гальмівними циліндрами 5. Шток опорного циліндра 6 з'єднаний зі скобою 3, а корпус опорного циліндра 6 з нерухомою деталлю. Штокова порожнина 7 опорного циліндра 6 гідравлічно пов'язана з робочим циліндром 4 і через функціональний клапан 8 – з магістраллю управління 9. Штокові порожнини опорних 7 циліндрів 6 гідравлічно пов'язані з торцевими порожнинами 11 підпружиненого золотника 12 чотириходового золотникового розподільника 13. Внутрішні порожнини 14, утворені золотником 12, в корпусі пов'язані з відповідними додатковими гальмівними циліндрами.

Гальмівна Система працює наступним чином. При зміні гальмівного моменту на лівому або правому дискових гальмах, що обумовлений зміною коефіцієнта тертя або зміною середнього радіуса тертя $R_{ср}$, змінюється момент сил тертя щодо вісі шарніра 2. При цьому рівновага скоби 3 порушується. Скоба 3 повертається навколо шарніра 2, при цьому змінюється тиск у порожнинах робочих гальмівних циліндрів 4 і штокових порожнинах 7 опорних циліндрів 6. Зміна тиску в порожнинах робочих гальмівних циліндрів 4 викликає відповідну зміну гальмівних моментів дискових гальм. Різниця сил тиску гальмівної рідини в штоковій 7 і 10 безштоковой порожнинах пропорційна гальмівному моменту.

Припустимо, що гальмівний момент лівого дискового гальма менший, ніж правого. Це означає, що тиск гальмівної рідини в штоковій порожнині 7 лівого гальма вище, ніж у штоковій порожнині 7 правого гальма. Тиск рідини в лівій порожнині 11 золотникового розподільника 13 стає більшим, ніж у правій порожнині 11. Рівновага

золотника 12 порушується, він зміщується праворуч, тиск рідини лівої штокової порожнини 14 золотника 12 зростає, відповідно зростає тиск у лівому додатковому гальмівному циліндрі, що призводить до збільшення гальмівного моменту на лівому дисковому гальмі. Гальмівний момент лівого гальма буде збільшуватися доти, доки тиск у штокових порожнинах 7 обох опорних циліндрів гальмівних механізмів стане рівним. При цьому тиск гальмівної рідини в порожнинах золотникового 11 розподільника 13 також стане рівним і пружини перемістять золотник 12 в нейтральне положення. Після цього процес повторюється автоматично при кожній нерівномірності гальмівних моментів на колесах однієї вісі автомобіля.

Наведемо характеристики Системи при гідростатичному гальмівному приводі.

Гальмівні моменти на лівому та правому гальмівних механізмах, відповідно:

$$M_{T\Lambda} = (p_{1\Lambda}F_1 + p'_{1\Lambda}F'_1)\mu_{\Theta}^{\Lambda}R_{cp}Z, \tag{1}$$

$$M_{T\Pi} = (p_{1\Pi}F_1 + p'_{1\Pi}F'_1)\mu_{\Theta}^{\Pi}R_{cp}Z, \tag{2}$$

де $p_{1\Lambda}$, $p_{1\Pi}$ – тиск рідини в основних робочих гальмівних циліндрах лівого та правого гальма; $p'_{1\Lambda}$, $p'_{1\Pi}$ – тиск рідини в додаткових робочих гальмівних циліндрах лівого та правого гальма; F, F'_1 – площі поршнів основного та додаткового робочих гальмівних циліндрів; μ_{Θ}^{Λ}, μ_{Θ}^{Π} – еквівалентні значення коефіцієнтів тертя фрикційних пар лівого та правого гальма, що отримані з умови сталості середнього радіуса тертя; R_{cp} – середній радіус тертя, приймається рівним:

$$R_{cp} = \frac{R_H + R_{BH}}{2}, \tag{3}$$

R_H, R_{BH} – зовнішній та внутрішній радіуси тертя; Z – кількість пар тертя.

Наведемо рівняння рівноваги скоб лівого та правого гальм в обертальному русі у площині гальмівного диска:

$$p_0F_3 - p_{1\Lambda}F_2 = \frac{M_{T\Lambda}}{R_{cp}} \cdot \frac{I_1}{I_2}, \tag{4}$$

$$p_0F_3 - p_{1\Pi}F_2 = \frac{M_{T\Pi}}{R_{cp}} \cdot \frac{I_1}{I_2}, \tag{5}$$

де p_0 – тиск робочої рідини в магістралі рівняння; F_2, F_3 – площі поршнів опорних циліндрів; I_1 – плече сили тертя щодо вісі шарніра; I_2 – відстань від вісі опорного циліндра до вісі шарніра.

Припустимо, що $\mu_{\Theta}^{\Lambda} > \mu_{\Theta}^{\Pi}$ ($p'_{1\Lambda} = 0$). У цьому випадку рівняння рівноваги керуючого клапана має вигляд:

$$p_{1\Pi}F_5 - p'_{1\Lambda}F_4 + p_0F_4 - p_{1\Lambda}F_5 = 0, \tag{6}$$

де F_4, F_5 – менша та більші площі золотникового розподільника.

З рівняння (6) визначимо:

$$p'_{1\Lambda} = \frac{F_5}{F_4}(p_{1\Lambda} - p_{1\Lambda}) + p_0. \tag{7}$$

Підставляючи (1) і (2) до (3) та (4) отримаємо з урахуванням (7) після перетворень:

$$p_{1\Lambda} = p_0 \frac{F_3 - F'_1\mu_{\Theta}^{\Lambda}Z\frac{I_1}{I_2}}{F_2 + F_1\mu_{\Theta}^{\Pi}Z\frac{I_1}{I_2}}, \tag{8}$$

$$p'_{1\Lambda} = \frac{F_5}{F_4}\left(p_{1\Pi} - p_0\frac{F_3 - F'_1\mu_{\Theta}^{\Lambda}Z\frac{I_1}{I_2}}{F_2 + F_1\mu_{\Theta}^{\Pi}Z\frac{I_1}{I_2}}\right) + p_0. \tag{9}$$

Вирішуючи спільно (2), (5) та (9) отримаємо:

$$p_{1\Pi} = p_0 \frac{F_3 - F'_1\mu_{\Theta}^{\Pi}Z\frac{I_1}{I_2}\left(1 - \frac{F_5}{F_4} \cdot \frac{F_3 - F'_1\mu_{\Theta}^{\Lambda}Z\frac{I_1}{I_2}}{F_2 + F_1\mu_{\Theta}^{\Pi}Z\frac{I_1}{I_2}}\right)}{F_2 + F_1\mu_{\Theta}^{\Pi}Z\frac{I_1}{I_2}(F_1 + \frac{F_5}{F_4}F'_1)}, \tag{10}$$

$$p'_{1П} = p_0 \left[\frac{F_3 \frac{F_5}{F_4} - F_1' \frac{F_5}{F_4} \text{ì}^{\,\acute{I}}_{\acute{Y}} Z \frac{I_1}{I_2} \left(1 - \frac{F_5}{F_4} \cdot \frac{F_3 - F_1' \text{ì}^{\,\acute{E}}_{\acute{Y}} Z \frac{I_1}{I_2}}{F_2 + F_1 \text{ì}^{\,\acute{E}}_{\acute{Y}} Z \frac{I_1}{I_2}} \right)}{F_2 + \text{ì}^{\,\acute{I}}_{\acute{Y}} Z \frac{I_1}{I_2} \left(F_1 + \frac{F_5}{F_4} F_1' \right)} - \frac{F_5}{F_4} \cdot \frac{F_3 - F_1' \text{ì}^{\,\acute{E}}_{\acute{Y}} Z \frac{I_1}{I_2}}{F_2 + F_1 \text{ì}^{\,\acute{E}}_{\acute{Y}} Z \frac{I_1}{I_2}} + 1 \right]. \quad (11)$$

Підставляючи (10) і (11) у (2) отримаємо після перетворень:

$$M_{ТП} = p_0 F_1 R_{\text{ср}} Z \text{ì}^{\,\acute{I}}_{\acute{Y}} \frac{\left(1 + \frac{F_5}{F_4} \cdot \frac{F_1'}{F_1} \right) F_3 + F_2 \frac{F_1'}{F_1} \left(1 - \frac{F_5}{F_4} \cdot \frac{F_3 - F_1' \text{ì}^{\,\acute{E}}_{\acute{Y}} Z \frac{I_1}{I_2}}{F_2 + F_1 \text{ì}^{\,\acute{E}}_{\acute{Y}} Z \frac{I_1}{I_2}} \right)}{F_2 + \text{ì}^{\,\acute{I}}_{\acute{Y}} Z \frac{I_1}{I_2} \left(1 + \frac{F_5}{F_4} \frac{F_1'}{F_1} \right)}. \quad (12)$$

Підставляючи (8) до (1), отримаємо:

$$M_{ТЛ} = p_0 F_1 R_{\text{ср}} Z \text{ì}^{\,\acute{E}}_{\acute{Y}} \frac{F_3 + F_2 \frac{F_1'}{F_1}}{F_2 + F_1 \text{ì}^{\,\acute{E}}_{\acute{Y}} Z \frac{I_1}{I_2}}. \quad (13)$$

Оцінюючи характеристики гальмівних механізмів використовується наведений коефіцієнт тертя. Для дискових гальм цей коефіцієнт можна визначити, як:

$$\mu_{\text{прив}} = \frac{M_T}{p_0 F_i R_{\text{ср}} Z}. \quad (14)$$

Для дискового гальма без зворотного зв'язку за гальмівним моментом:

$$\mu_{прив} = \mu_{Э}. \quad (15)$$

Підставляючи (12) і (13) у (14) отримаємо для лівого та правого гальмівних механізмів:

$$\mu^{Л}_{\text{прив}} = \frac{\mu^{Л}_{Э}}{\frac{F_2}{F_1} + \mu^{Л}_{Э} Z \frac{I_1}{I_2}} \left(\frac{F_3}{F_1} + \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{F_1'}{F_1} \right). \quad (16)$$

$$\mu^{П}_{\text{прив}} = \frac{\mu^{П}_{Э}}{\frac{F_2}{F_1} + \mu^{П}_{Э} Z \frac{I_1}{I_2} \left(1 + \frac{F_5}{F_4} \cdot \frac{F_1'}{F_1} \right)} \left(\left(1 + \frac{F_5}{F_4} \cdot \frac{F_1'}{F_1} \right) \frac{F_3}{F_1} + \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{F_1'}{F_1} \left(1 - \frac{F_5}{F_4} \frac{F_3 - F_1' \mu^{Л}_{Э} Z \frac{I_1}{I_2}}{F_2 + F_1 \mu^{Л}_{Э} Z \frac{I_1}{I_2}} \right) \right). \quad (17)$$

Нерівномірність гальмівних моментів на колесах однієї вісі можна оцінити коефіцієнтом нерівномірності:

$$K_{нер} = \frac{M_{ТЛ}}{M_{ТП}} = \frac{\mu^{Л}_{прив}}{\mu^{П}_{прив}}. \quad (18)$$

Для дискового гальма без зворотного зв'язку за гальмівним моментом:

$$K_{нер} = \frac{\mu^{Л}_{Э}}{\mu^{П}_{Э}}. \quad (19)$$

Для дискових гальм із негативним зворотним зв'язком без керуючого клапана:

$$K'_{нер} = \frac{\mu^{Л}_{Э}}{\mu^{П}_{Э}} \cdot \frac{1 + \mu^{П}_{Э} Z \frac{F_1}{F_2} \frac{I_1}{I_2}}{1 + \mu^{Л}_{Э} Z \frac{F_1}{F_2} \frac{I_1}{I_2}} = K_{нер} \cdot K', \quad (20)$$

де K' – коефіцієнт зниження нерівномірності гальмівних моментів з допомогою запровадження негативного зворотний зв'язок одному гальмі.

Для запропонованої схеми, підставляючи (16) і (17) у (18) отримаємо після перетворень:

$$K'_{\text{нер}} = \frac{\text{ì}^{\ddot{E}}_{\acute{Y}}}{\text{ì}^{\acute{I}}_{\acute{Y}}} \cdot \frac{1+\text{ì}^{\acute{I}}_{\acute{Y}} Z \frac{F_1}{F_2}\left(1+\frac{F_5}{F_4}\cdot\frac{F_1'}{F_1}\right)\frac{I_1}{I_2}}{1+\text{ì}^{\ddot{E}}_{\acute{Y}} Z \frac{F_1}{F_2}\frac{I_1}{I_2}\left(1+\frac{F_5}{F_4}\cdot\frac{F_1'}{F_1}\right)\frac{I_1}{I_2}} = K_{\text{нер}} \cdot K''. \tag{21}$$

Порівнюючи (19), (20) та (21) можна зробити висновок, що:

$$K''_{нер} < K'_{нер} < K_{нер}. \tag{22}$$

Гальмівний момент на правому колесі можна виразити через гальмівний момент на лівому колесі:

$$M_{ТП} = \frac{M_{ТЛ}}{K''_{нер}} = p_0 F_1 Z R_{ср}\left(\frac{F_3}{F_2}+\frac{F_1'}{F_1}\right)\frac{\mu^{П}_{Э}}{1+\mu^{Л}_{Э}\frac{F_1}{F_2}\frac{I_1}{I_2}} \cdot \frac{1+\mu^{Л}_{Э} Z \frac{F_1}{F_2}\left(1+\frac{F_5}{F_4}\cdot\frac{F_1'}{F_1}\right)\frac{I_1}{I_2}}{1+\mu^{П}_{Э} Z \frac{F_1}{F_2}\left(1+\frac{F_5}{F_4}\cdot\frac{F_1'}{F_1}\right)\frac{I_1}{I_2}}. \tag{23}$$

Відповідно, отримаємо наведений коефіцієнт тертя:

$$\mu^{П}_{прив} = \left(\frac{F_3}{F_2}+\frac{F_1'}{F_1}\right)\frac{\mu^{П}_{Э}}{1+\mu^{Л}_{Э}\frac{F_1}{F_2}\frac{I_1}{I_2}} \cdot \frac{1+\mu^{Л}_{Э} Z \frac{F_1}{F_2}\left(1+\frac{F_5}{F_4}\cdot\frac{F_1'}{F_1}\right)\frac{I_1}{I_2}}{1+\mu^{П}_{Э} Z \frac{F_1}{F_2}\left(1+\frac{F_5}{F_4}\cdot\frac{F_1'}{F_1}\right)\frac{I_1}{I_2}}. \tag{24}$$

Таким чином, введенням негативного зворотного зв'язку по гальмівному моменту на кожному з дискових гальм зменшується нерівномірність гальмівних сил на колесах однієї осі автомобіля. Як результат, застосовуючи Систему, значно зменшується бортова нерівномірність автомобіля.

Слід додати, що для швидкодії та стабільної роботи золотникового розподільника необхідно підвести до нього додаткове джерело зусилля гальма у вигляді гідромотора високого тиску з резервом гальмівної рідини. Ця доробка дозволить покращити ефективність системи та забезпечить необхідне гальмівне зусилля на всі гальмівні механізми коліс незалежно від роботи двигуна автомобіля.

Попри того, що наведений вище варіант Системи хоч і є прогресивним, але він має свої недоліки. Зокрема, загрозою для безпеки автотранспорту та дорожнього руху є несправності гідравлічного контуру гальмівної системи, а саме: пошкодження гальмівної магістралі, витік гальмівної рідини з гальмівних циліндрів, повітря в гальмівній системі, пошкодження або розбухання гумових ущільнень гальмівних циліндрів, втрата герметичності контуру тощо.

Аналіз несправностей гідравлічних гальмівних систем АТЗ підтвердив необхідність пошуку альтернативного рішення конструкції гальмівного приводу та пристрою Системи.

Розглянемо концепцію Системи за допомогою введення нового складу елементів та нової організації взаємозв'язків між ними (рис. 2).

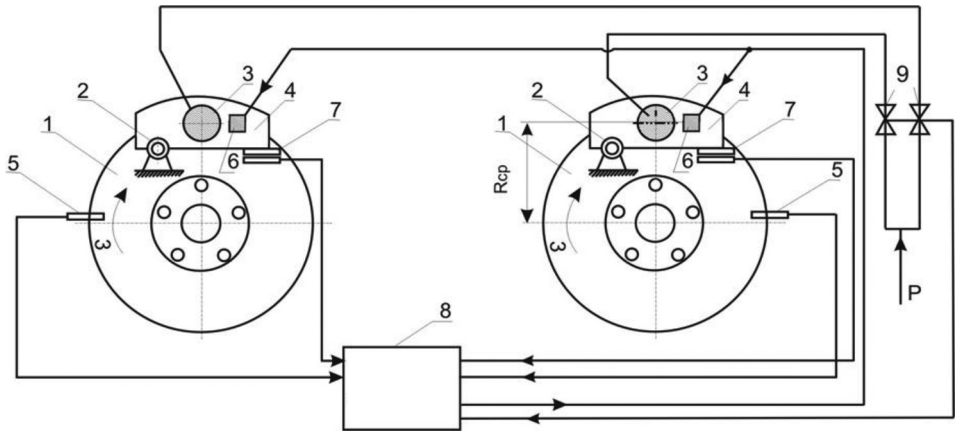


Рис. 2. Схема системи автоматичного зниження нерівномірности гальмівних моментів на колесах однієї вісі автомобіля за допомогою мехатронного модуля

В основу Системи поставлено завдання збереження гальмівних властивостей автомобіля в критичних ситуаціях шляхом введення нового складу елементів та нової організації взаємозв'язків між ними, забезпечення розширення функціональних можливостей для забезпечення безпеки автотранспорту та дорожнього руху [11].

Система автоматичного розподілу гальмівних моментів побудована за принципом роботи мехатронного модуля [1]. Гальмівна система включає дискові гальма, кожен з яких містить гальмівний диск 1, поворотну навколо шарніра 2 скобу 4 з розташованими в ній гальмівними робочими циліндрами 3; датчик величини гальмівного моменту (тензодатчик) 7 сигнал з якого надходить в електронний блок управління 8 мехатронного гальмівного пристрою 6 (мехатронний модуль поступального руху). Додатково встановлені: датчики кутової швидкості коліс 5, датчик контролю тиску в гальмівному приводі 9, що з'єднані з електронним блоком управління 8.

Пропонований гальмівний пристрій змонтований у вигляді моноблока на стандартному механізмі гальмівному. У конструкцію моноблока входить мехатронний модуль поступального руху для контролю гальмівного регульованого зусилля на гальмівних дисках коліс автомобіля (рис. 3).

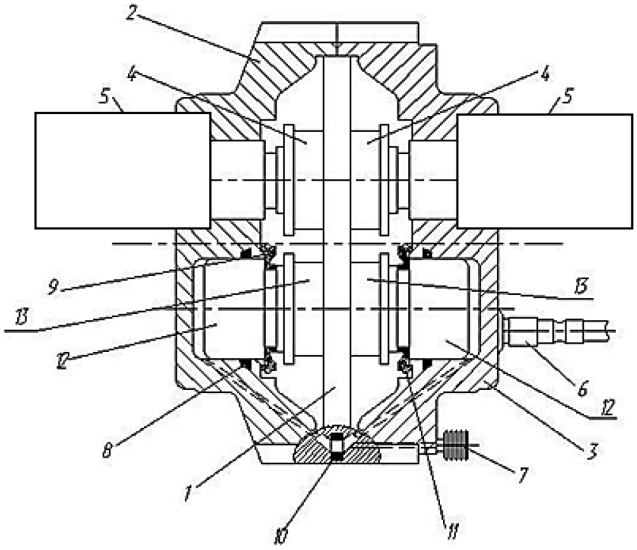


Рис. 3. Схема електрогідравлічного гальмівного пристрою, де: 1 – гальмівний диск; 2, 3 – зовнішня і внутрішня сторони корпусу; 4, 13 – гальмівні колодки; 5 – мехатронний модуль поступального руху; 6 – датчик тиску гальмівної рідини в системі трубопроводу; 7 – клапан випуску повітря; 9, 11 – сальник гальмівного циліндра; 8, 10, – ущільнювальні кільця; 12 – циліндри гідравлічного приводу гальмування

Система зниження нерівномірності гальмівних моментів працює за заданим алгоритмом, який побудований за принципом багатоваріантного циклу. Тобто він має початок та поділ на варіанти роботи. У певний момент роботи кожен варіант повертається на певний вище ступінь роботи. Таке рішення алгоритму дозволяє уникнути ситуацій типу «глухий кут». Зокрема, забезпечується постійна працездатність блоку управління штатного режиму роботи, аварійного режиму роботи, режиму руху на малих швидкостях автомобіля та режиму екстреного гальмування.

При зміні гальмівного моменту на лівому або правому дискових гальмівних механізмах, що обумовлені зміною коефіцієнта тертя, або зміною середнього радіуса Rср, змінюється момент сил тертя щодо вісі шарніра 2, рівновага скоби 4 порушується (див. рис. 2). Скоба 4 повертається навколо шарніра 2, при цьому з'являється сигнал у тензодатчику 7, який надходить на електронний блок керування 8. Зміна гальмівного моменту викликає зміну кутової швидкості обертання гальмівного диска 1 і, як наслідок, зміну сигналу датчика 5 кутової швидкості коліс. Сигнал з датчиків 5 і 7 обробляється блоком управління 8, який, на підставі порівняння сигналів від датчиків лівого та правого колеса автомобіля оцінює нерівномірність гальмівних моментів, кутову швидкість кожного колеса і видає керуючий сигнал на гальмівний пристрій 6, мехатронний модуль поступального руху якого з'єднаний з додатковою гальмівною колодкою, яка почне переміщатися до гальмівного диска та створювати додатковий гальмівний момент. При вирівнюванні гальмівних моментів блок управління 8 відключає гальмівний пристрій 6.

При пошкодженні гідроприводу або забруднення гальмівної рідини із датчика 9 надходить сигнал на електронний блок управління 8 з наступною командою на гальмівний пристрій 6, що виконує, в цьому випадку, роль аварійного (запасного) контуру гальмівної системи автомобіля.

При цьому, заздалегідь заданою програмою, блок управління 8, незалежно від водія, може автоматично зупиняти автомобіль. Датчики 5, 7, 9, блок управління 8 можна використовувати в системі функціональної діагностики для контролю роботи гальмівної системи автомобіля.

Висновки

Введення негативного зворотного зв'язку на кожному з дискових гальм зменшує нерівномірність гальмівних сил на колесах однієї вісі автомобіля. При цьому введенням пристрою для стабілізації розподілу гальмівних моментів між колесами однієї вісі значно зменшується бортова нерівномірність автомобіля.

Запропоноване рішення конструкції гальмівного приводу скорочує час передачі енергії від джерела енергії до виконавчих пристроїв, що дає можливість використовувати його як запасний контур при аварійному гальмуванні та як надійне гальмо стоянки в поєднанні з протиугінними пристроями. Крім того, його можна застосовувати як функціональну діагностику для контролю працездатності гальмівної системи.

Перспектива використання нових електронних, механічних та інформаційних технологій у гальмівній системі автомобіля дозволяє створити гальмівну систему нового покоління для різних видів автомобілів, що є актуальною темою для подальших досліджень.

Список використаної літератури

1. Алексєєв В. О., Волков В. П., Калмиков В. І. Мехатроніка транспортних засобів та систем: навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 2004. 176 с.
2. Бех В. М., Шевченко І. О. Безпека дорожнього руху та транспортна політика в Україні. Київ: Либідь, 2017.
3. Булгаков Н. А., Гредескул А. Б., Ломака С. І. Дослідження динаміки гальмування автомобіля. *Наукове повідомлення № 18*. Харків : Вид-во Харків. Держуніверситет, 1962. 36 с.
4. Гредескул А. Б. Вплив блокування колеса на гальмування автомобіля. Вісті ВНЗ. *Машинобудування*, 1962. № 8. С. 31–36.
5. Гріньов А. М., Мельник О. В. Проблеми безпеки дорожнього руху в Україні. Київ: Університет транспортного будівництва, 2020. С. 25.
6. Леонтьев Д. М., Рижих Л. О., Бикадоров О. В. й ін. Методи розрахунку коефіцієнту зчеплення, що реалізується при коченні колеса в гальмівному режимі. *Автомобільний транспорт*, 2010. Вип. № 27. С. 7–12.
7. Подригало М. А., Волков В. П., й ін. Поліпшення стійкості автомобіля при гальмуванні шляхом підвищення стабільності гальмівного дискового механізму відкритого типу. *Автомобільний транспорт*. Вип. 7–8. Харків : ХНАДУ. 2001. С. 89–91.
8. Подригало М. А., Волков В. П., й ін. Дослідження стабільності гальмівних механізмів за допомогою узагальненого рівняння гальмівного моменту. *Автоматизація процесів та управління*, 2002. № 36. С. 71–74.
9. Подригало М. А., Волков В. П., Доброгорський М. В., Варваров Л. Н. Оцінка стійкості автомобіля при випереджаючому блокуванні передніх коліс у процесі гальмування. Тракторна енергетика у рослинництві. Харків : ХДТУСГ. 2003. Вип. 6. С. 130–135.
10. Подригало М. А., Волков В. П., Доброгорський М. В. Оцінка стійкості автомобіля при випереджальному блокуванні задніх коліс у процесі гальмування. *Автомобілі та тракторобудування*. Харків : НТУ «ХПІ» 2004. № 2. З. 101–109.
11. Степанов О. В. Система курсової стійкості як фактор безпеки автотранспорту. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів : Вісник ХНТУСГ*. Харків, 2017. Вип. 10. С. 44–48.
12. Федосов А. С., Подригало М. А. Вплив бічної сили на оригінальність блокування коліс гальмівної вісі автомобіля. *Автомобільний транспорт*. Вип.16. Київ : Техніка, 1979. С. 53–57.
13. Туренко А. М., Богомолов В. О., Клименко В. І., й ін. Функціональний розрахунок гальмівної системи автомобіля з барабанними гальмами та регулятором гальмівних сил. Храків : ХНАДУ, 2003. 120 с.
14. Леонтьев Д. М., Рижих Л. О., Бикадоров О. В., й ін. Методи розрахунку коефіцієнту зчеплення, що реалізується при коченні колеса в гальмівному режимі. *Автомобільний транспорт*, 2010. Вип. № 27. С. 7–12.
15. Adaptive Cruise Control The intelligent solution WABCO. (2005). URL: Windows 2000/XP.
16. BVA/EBS Gutachterliche Stellungnahme TÜV Automotive Test Center TB. 2002. 64.00. (2004). [Electronic resource]. Hanover: WABCO INFORM, p. 8. Access mode: www.wabco-auto.com
17. ELB, das elektronisch gesteuerte Bremssystem verspricht Kurzere Reaktionszeiten. (1985). Autotechnik und Verkehr, p. 34. URL: www.wabco-auto.com
18. KNORRBREMSE System for commercial Vehicles. (2020). Electronic braking system for Trailers with roll over protection. [Electronic resource]: Product information. Access mode: http://en.knorr-bremsesfn.com/systems/
19. Technical Report No EB 134.1E for Trailer EBS D generation with Roll Stability support (RSS). (2007). [Electronic resource]. Hanover: WABCO INFORM, p. 21. Access mode: www.wabco-auto.com.20. Kroemer Ebergard (1972). Pedal Operation by the Seated Operator. SAE paper. № 720004, p. 1–10.
21. Geupel Helmut und Reicel Max (1977). Auslegung der Betätigungseinrichtung für Bremsen von Personenwagen. ATZ. № 7/8, pp. 291–294.
22. Geupel Helmut (1977). Bremsanlage der neuen großen BMW-Wagen. Bauraihe. ATZ. № 11, pp. 499–504.

23. Segel L. Mortimer R.(1970). Driver Braking Performance as a Function of Pedal – Force and Pedal Displacement Ferrell's. Paper of International Automobile safety Conference, May-June 1970, Bruxelles and Detroit, New York. SAE paper. 1319 p.

24. Mortimer G. Rudolf (1971). Some Braces are Too Sensitive According to Performance Tests // Automotive Engineering. May, pp. 31–35.

25. Fazekas G.A. (1951). Brace torque. Automobile Engineer. № 5, pp. 185–191.

References

1. Alekseev V. O. Volkov V. P., Kalmykov V. I. (2004). Mechatronics of transport vehicles and systems: a textbook. Kharkiv : KhNADU, p. 176.

2. Bekh V. M., Shevchenko I. O. (2017). Road Safety and Transport Policy in Ukraine. Kyiv : Lybid.

3. Bulhakov N. A., Hredeskul A. B., Lomaka S. I. (1962). Study of the dynamics of car braking. Scientific communication No. 18. Kharkiv : Kharkiv State University Publishing House, p. 36.

4. Hredeskul A. B. (1962). Influence of the wheel locking on the car braking. News of Universities. *Mechanical Engineering*. No. 8, pp. 31–36.

5. Hrynev A. M., Melnyk O. V. (2020). Problems of Road Traffic Safety in Ukraine. Kyiv : University of Transport Construction, p. 25.

6. Leontiev D. M., Ryzhykh L. O., Bykadorov O. V., and others. (2010). Methods for calculating the coefficient of adhesion realized when the wheel rolls in the braking mode. *Automobile transport*. Issue No. 27, pp. 7–12.

7. Podryhalo M. A., Volkov V. P., and others. (2001). Improving the stability of the car during braking by increasing the stability of the open-type disc brake mechanism // Automobile transport. Collection of scientific papers. Issues No. 7–8. Kharkiv : KhNADU, pp. 89–91.

8. Podryhalo M. A., Volkov V. P., and others. (2002). Investigation of the braking mechanisms stability by means of the generalized equation of the braking moment. *Process Automation and Control*. No. 36, pp. 71–74.

9. Podryhalo M. A., Volkov V. P., Dobrohorskyi M. V., Varvarov L. N. (2003). Estimation of vehicle stability at advance blocking of front wheels in the process of braking. *Tractor power in crop production collection of scientific papers*. Kharkiv : KhGTUSKh. Issue No. 6, pp. 130–135.

10. Podryhalo M. A., Volkov V. P., Dobrohorskyi M. V. (2004). Assessment of vehicle stability at the rear wheels' advance locking during braking. *Automobile and tractor construction*. Kharkiv : NTU "KhPI". No. 2, pp. 101–109.

11. Stepanov O. V. (2017). System of exchange rate stability as a factor of motor vehicle safety. *Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes: Bulletin of KhTUSG*. Kharkiv. Issue No. 10, pp. 44–48.

12. Fedosov A. S.; Podryhalo M. A. (1979). Influence of the lateral force on the blocking of the wheels of the braking axis of the automobile. // Automobile transport. Issue No. 16. – Kyiv : Technics, pp. 53–57.

13. Turenko A. M., Bohomolov V. O., Klymenko V. I., and others. (2003). Functional calculation of the braking system of a car with drum brakes and a brake force regulator. Kharkiv : KhNADU, p. 120.

14. Leontiev D. M., Ryzhykh L. O., Bykadorov O. V., and others. (2010). Methods for calculating the coefficient of adhesion realized during wheel rolling in braking mode. *Automobile transport*. Issue No. 27, pp. 7–12.

15. Adaptive Cruise Control The intelligent solution WABCO. (2005). URL: Windows 2000/XP.

16. BVA/EBS Gutachterliche Stellungnahme TÜV Automotive Test Center TB. 2002. 64.00. (2004). [Electronic resource]. Hanover: WABCO INFORM, p. 8. Access mode: www.wabco-auto.com.

17. ELB, das elektronisch gesteuerte Bremssystem verspricht Kurzere Reaktionszeiten. (1985). Autotechnik und Verkehr, p. 34. URL: www.wabco-auto.com

18. KNORRBREMSE System for commercial Vehicles. (2020). Electronic braking system for Trailers with roll over protection. [Electronic resource]: Product information. Access mode: http://en.knorr-bremsesfn.com/systems/

19. Technical Report No EB 134.1E for Trailer EBS D generation with Roll Stability support (RSS). (2007). [Electronic resource]. Hanover: WABCO INFORM, p. 21. Access mode: www.wabco-auto.com.20. Kroemer Ebergard (1972). Pedal Operation by the Seated Operator. SAE paper. № 720004, p. 1–10.

21. Geupel Helmut und Reicel Max (1977). Auslegung der Betätigungseinrichtung für Bremsen von Personenwagen. ATZ. № 7/8, pp. 291–294.

22. Geupel Helmut (1977). Bremsanlage der neuen großen BMW-Wagen. Bauraihe. ATZ. № 11, pp. 499–504.

23. Segel L. Mortimer R.(1970). Driver Braking Performance as a Function of Pedal – Force and Pedal Displacement Ferrell's. Paper of International Automobile safety Conference, May-June 1970, Bruxelles and Detroit, New York. SAE paper. 1319 p.

24. Mortimer G. Rudolf (1971). Some Braces are Too Sensitive According to Performance Tests // Automotive Engineering. May, pp. 31–35.

25. Fazekas G. A. (1951). Brace torque. Automobile Engineer. № 5, pp. 185–191.

УДК 656.13 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.35

О. В. СТЕПАНОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри тракторів і автомобілів
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: 0000-0003-4954-2532

Т. В. ВОЛОБУЄВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри машинобудування
Одеська державна академія будівництва та архітектури
ORCID: 0000-0003-0340-3326

ІНТЕГРАЛЬНИЙ БРАКУВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТР МАСТИЛЬНОЇ ОЛИВИ ДЛЯ ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ

Під час роботи вантажного автотранспорту водій не має інформації про стан мастильної оливи. Це ускладнює ухвалення своєчасного рішення щодо її заміни та призводить до передчасного ламання силових агрегатів. Для контролю на автопідприємстві якості оливи шляхом проведення фізико-хімічного аналізу проб необхідно мати спеціальну лабораторію, постійний штат спеціально підготовлених співробітників та відповідне обладнання. Це призводить до того, що автотранспорт змушений простоювати в очікуванні результатів аналізу. Метою дослідження є визначення інтегрального бракувального параметра мастильної оливи, що характеризує фактичний стан мастильної оливи в силових агрегатах вантажного автотранспорту під час експлуатації. Для надійності силових агрегатів автотранспорту необхідно визначити бракувальний параметр мастильної оливи для визначення якісного стану та своєчасної заміни мастильної оливи в силових агрегатах автотранспорту. З'ясовано, що інтегральним бракувальним параметром мастильної оливи, для характеристики фактичного стану оливи, може бути електропровідність оливи. Вона реагує на зміну її важливих властивостей, зокрема, протизносних. Інтенсивність зміни електропровідності, в міру збільшення ступеня відпрацьованості мастильної оливи та збільшення температури мастильної оливи в умовах підвищеної запиленості, обумовлена значним зростанням у мастилі частинок зносу від тертя поверхні. Зроблено висновок, що електропровідність може бути інтегральним бракувальним параметром мастильної оливи. Зокрема, для кожної мастильної оливи існують допустимі значення електропровідності (бракувальні значення). При досягненні величини електропровідності бракувального значення різко зростає зношеність у вузлах тертя, а разом із ним і сама електропровідність, що обумовлено різким збільшенням концентрації в мастильній оливі механічних домішок неорганічного походження (часток зношення).

Ключові слова: *вантажний автотранспорт, силові агрегати, мастильна олива, інтегральний бракувальний параметр, електропровідність.*

O. V. STEPANOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Tractors and Cars
National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine
ORCID: 0000-0003-4954-2532

T. V. VOLOBUYEVA
Ph.D., Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering
Odesa State Academy of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0003-0340-3326

INTEGRAL REJECTION OF LUBRICATING OIL FOR FREIGHT VEHICLES

During the operation of a freight vehicle, the driver has no information about the condition of the lubricating oil. This makes it difficult to make a timely decision to replace it and leads to premature breakdown of power units. In order to control the quality of oil at an automotive enterprise by conducting physical and chemical analysis of samples, it is necessary to have a special laboratory, a permanent staff of specially trained employees and the appropriate equipment. This leads to the fact that vehicles are forced to stand idle while waiting for the results of the analysis. The aim of the study is to determine the integral rejected parameter of lubricating oil, which characterizes the actual state of lubricating oil in the power units of freight vehicles during operation. In order to ensure the reliability of motor vehicle power units,

it is necessary to determine the rejection parameter of lubricating oil to determine the quality condition and timely replacement of lubricating oil in motor vehicle power units. It has been found that the integral rejected parameter of lubricating oil to characterize the actual state of the oil can be the electrical conductivity of the oil. It reacts to changes in its important properties, in particular, anti-wear properties. The intensity of the change in electrical conductivity, as the degree of lubricating oil wear increases and the temperature of the lubricating oil increases under conditions of high dust content, is due to a significant increase in the wear particles in the lubricating oil from surface friction. It is concluded that electrical conductivity can be an integral rejection parameter of lubricating oil. In particular, for each lubricating oil, there are permissible values of electrical conductivity (rejection values). When the value of electrical conductivity reaches the reject value, wear in friction units increases sharply, and with it the electrical conductivity itself, due to a sharp increase in the concentration of mechanical impurities of inorganic origin (wear particles) in lubricating oil.

Key words: *freight vehicle, power units, lubricating oil, integral rejection parameter, electrical conductivity.*

Постановка проблеми

Технічний стан вантажного автотранспорту (далі – автотранспорт) змінюється з часом, і в процесі збільшення пробігу його характеристики погіршуються. Ефективність роботи силових агрегатів автотранспорту залежить від якості мастильної оливи, яку використовують. Потреба в заміні оливи визначається на основі закономірностей зміни її властивостей залежно від умов роботи і експлуатації автотранспорту [2, 4].

Для встановлення терміну служби мастильної оливи в силових агрегатах автотранспорту необхідно регулярно контролювати її якість через фізико-хімічний аналіз проб. Спеціалізовані автопідприємства мають лабораторії, що оснащені необхідним обладнанням і штатними співробітниками для проведення таких аналізів. Однак, оскільки кожен аналіз потребує значного часу, це може призвести до простою технологічного автотранспорту, який чекає на результати.

З метою забезпечення надійності силових агрегатів автотранспорту необхідно розробити мобільний інтегральний бракувальний параметр мастильної оливи, що дозволить оперативно оцінювати її фактичний стан під час експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблеми тертя та зносу в елементах транспортних засобів за різних умов експлуатації, а також підвищення допустимих норм зносостійкості висвітлювали у своїх різнопланових працях Г. А. Баглюк, А. О. Бабенко, Л. І. Бершадський, Є. С. Венцель, В. І. Голінько, Є. А. Дубінін, О. В. Закалов, Б. І. Костецький, М. В. Кондрачук, І. Г. Носовський, П. В. Назаренко, Є. В. Пашечко, С. М. Попов, О. С. Полянський й ін. Ними зазначено, що в загальній проблемі зношуванню поверхонь деталей важливе місце належить питанням змащувальної дії та, відповідно, якості мастильної оливи [1–3, 5, 6–8, 10].

Аналіз наукових джерел показує, що ефективність роботи масляних фільтрів та гумових ущільнень залежить від рівня запиленості повітря, на що, в свою чергу, впливає кількість абразивних часток (пилу), які потрапляють у вузли й агрегати автотранспорту [2, 6, 9, 11]. Отже, під час експлуатації автотранспорту, зокрема технологічного, мастильна олива забруднюється різними механічними домішками, а їхня кількість поступово зростає [9, 11]. Це створює необхідність для розвитку більш ефективних засобів діагностики, які можуть контролювати рівень забруднення мастильної оливи в силових агрегатах автотранспорту під час їх роботи.

Формулювання мети дослідження

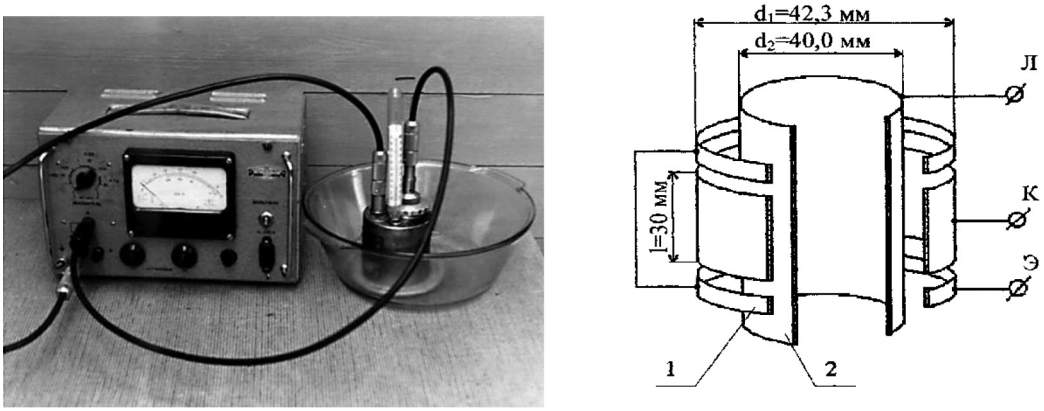
Визначити інтегральний бракувальний параметр мастильної оливи, що характеризує фактичний стан мастильної оливи в силових агрегатах вантажного автотранспорту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Під час експлуатації автотранспорту водій не отримує інформацію про стан мастильної оливи, що ускладнює прийняття рішення щодо її своєчасної заміни. Таким чином, виникає потреба у мобільній діагностиці для оцінки стану мастильної оливи (бракувального параметра) в силових агрегатах транспорту. Було висунуто припущення, що електропровідність оливи, яка змінюється в залежності від змін її ключових властивостей, може слугувати інтегральним бракувальним параметром для оцінки її фактичного стану. Це пояснюється тим, що електропровідність чутливо реагує на зміни важливих характеристик оливи, зокрема, її протизносних властивостей.

Дослідження електропровідності оливи було проведене за допомогою лабораторного тераомметра типу МОМ-4 (надалі – прилад). Прилад дозволяє вимірювати опір в широкому діапазоні значень, має компактні розміри (308х194х216 мм), простий у використанні та експлуатації. Він живиться від мережі змінного струму 220 В з частотою 50 Гц і споживає потужність 40 Вт (рис. 1).

Прилад оснащений додатковими вимірювальними електродами для визначення питомого опору електроізоляційних матеріалів (який є оберненою величиною електропровідності) в діапазоні від 2×10^3 Ом до 10^{13} Ом, з дев'ятьма межами вимірювань (від 1 кОм до 10 ТΩ). Вимірювальне осердя приладу, що призначене для оцінки опору рідких діелектриків, складається з двох вимірювальних електродів, розташованих у коаксіальному циліндровому виконанні.



(а) (б)

Рис. 1. Тераомметр МОМ-4 з вимірювальним осередком (а) та вимірювальне осердя приладу для вимірювання опору рідких діелектриків (б) (фото авторів)

Принцип роботи приладу полягає в підключенні вимірюваного опору до відомого каліброваного опору, що утворює дільник напруги, живлений стабілізованим джерелом. Визначення опору здійснюється через вимірювання розподілу напруги, з подальшим посиленням сигналу і вимірюванням за допомогою приладу для відліку.

Для оцінки електропровідності мастильних олив М-10-$Г_2$К і ТАП-15 (для автосамоскида КрАЗ) використовувалася чинна методика лабораторних вимірювань. Після завершення вимірювань обчислювався питомий об'ємний опір ρ, що визначається за спеціальною формулою:

$$\rho = R_V \cdot L \cdot \frac{d_1 + d_2}{d_1 - d_2} = 3{,}37 \cdot R_V \left[\text{Ом} \cdot \text{м}\right], \tag{1}$$

де R_v – отримане значення об'ємного опору на шкалі приладу, Ом; L – відстань між електродами, ($L = 30 \cdot 10^{-3}$ м); d_1 – діаметр зовнішнього циліндра, ($d_1 = 42{,}3 \cdot 10^{-3}$ м); d_2 – діаметр внутрішнього циліндра, ($d_2 = 40 \cdot 10^{-3}$ м).

Електропровідність мастила можна визначити як величину, обернену до його об'ємного опору. Встановлено, що у відпрацьованій моторній оливі М-10-$Г_2$К електропровідність є вищою через наявність металевих часток зносу, які сприяють підвищенню провідності оливи. Отже, з підвищенням кількості часток зносу в оливі її електропровідність збільшується (рис. 2, 3).

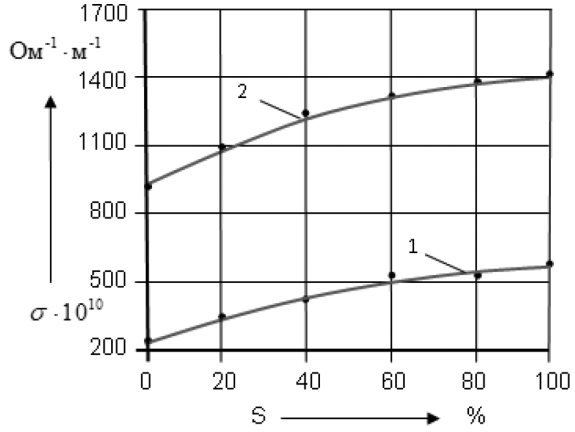


Рис. 2. Залежність електропровідності моторної оливи М-10-$Г_2$К від ступеня *S* його відпрацьованості при температурі: 20 °С (1) і 40 °С (2)

Під час дослідження кожна проба відпрацьованої оливи була протестована на електропровідність за встановленою методикою при температурах 20 °С, 40 °С, 60 °С та 80 °С (табл. 1).

Дослідження підтвердили, що з підвищенням температури моторної оливи, незалежно від ступеня її відпрацьованості, її електропровідність зростає експоненційно (рис. 4).

Подібні дослідження були проведені і для трансмісійної оливи ТАП-15, що знаходилася в коробці передач (КП), роздавальній коробці (РК) та редукторі заднього моста (ЗМ) автосамоскида (табл. 2). З'ясовано, що електропровідність трансмісійної оливи ТАП-15 зростає параболічно зі збільшенням її відпрацьованості (табл. 2).

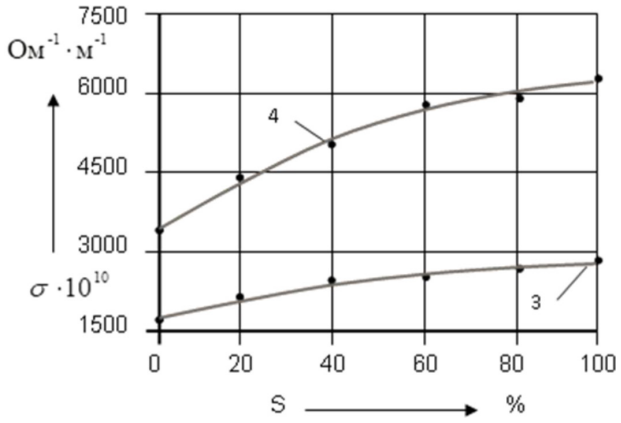


Рис. 3. Залежність електропровідності моторної оливи М-10-Г$_2$К від ступеня *S* його відпрацьованості при температурі: 60 °С (3) і 80 °С (4)

Таблиця 1

Зміна електропровідності відпрацьованої моторної оливи М-10-Г2 К у порівнянні з новою моторною оливою

Марка оливи	Температура t °С	Електропровідність σ · 10^{10}, Ом$^{-1}$ · м$^{-1}$				Збільшення електропровідності в порівнянні зі свіжим
		S = 0 %	*S* = 80 %	*S* = 90 %	*S* = 100 %	
М-10-Г$_2$К	20	247,38	498,2	504,5	529,39	2,14
	40	913,41	1241,3	1324,4	1406,65	1,54
	60	1521,22	2251,4	2163,3	2479,58	1,63
	80	3121,13	5983,8	6158,6	6373,24	1,81

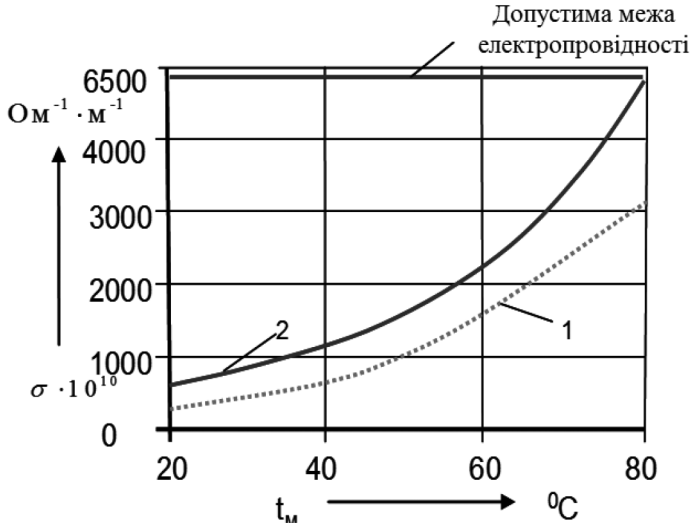


Рис. 4. Залежність електропровідності моторної оливи М-10-Г$_2$К від температури $t_м$, °С: 1 – нова олива; 2 – відпрацьована олива на 100 %

Таблиця 2

Зміна електропровідності відпрацьованої трансмісійної оливи ТАП-15 в порівнянні з новою трансмісійною оливою

Марка оливи	Температура *t* °С	Електропровідність при *S* = 100 % σ · 10^{10}, Ом$^{-1}$ · м$^{-1}$			
		S = 0 %	РК	КП	ЗМ
ТАП-15	20	216,7	524,6	508,2	441,8
	40	425,8	2421,3	2121,8	1903,6
	60	704,2	4010,7	3224,5	2926,8
	80	1598	5772,4	5398,6	4781,1

Зі збільшенням температури трансмісійної оливи ТАП-15 також відзначалося зростання її електропровідності (рис. 5).

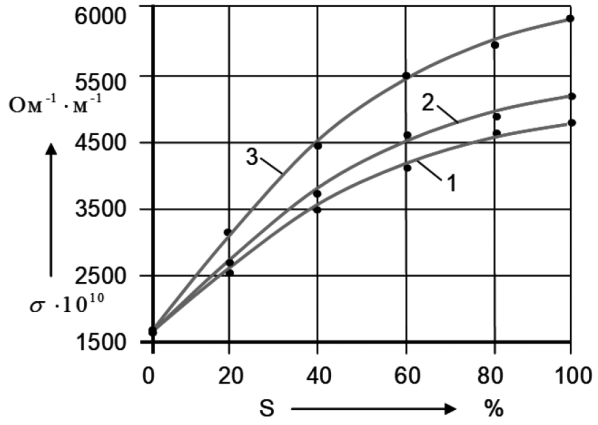


Рис. 5. Залежність електропровідності трансмісійної оливи ТАП-15 від ступеня *S* його відпрацьованості в агрегатах при $t_м$ = 80 °С: ЗМ (1), КП (2), РК (3)

Дослідження показали, що інтенсивність зміни електропровідності зростає із підвищенням ступеня відпрацьованості мастильної оливи (рис. 6) та температури мастила в умовах підвищеної запиленості (рис. 7). Це зумовлено значним збільшенням кількості частинок зносу, що утворюються внаслідок тертя поверхонь (табл. 3).

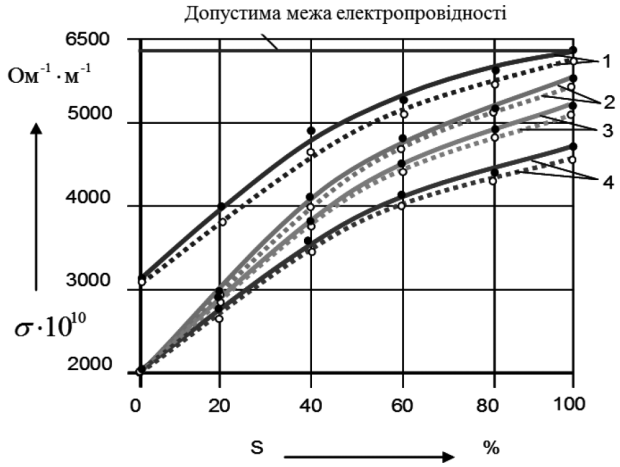


Рис. 6. Залежність електропровідності моторної оливи М-10-$Г_2$К (1) і трансмісійної оливи ТАП-15 від ступеня відпрацьованості, де: 2 – РК, 3 – КП, 4 – ЗМ

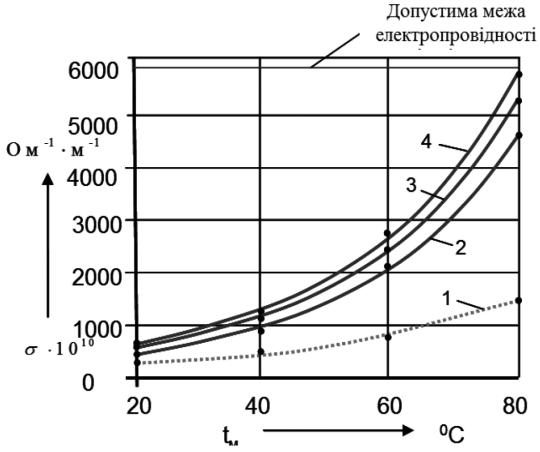


Рис. 7. Залежність електропровідності трансмісійної оливи ТАП-15 від температури $t_м$, °С, де: 1 – нова олива. Відпрацьована олива на 100 % в агрегатах: 2 – ЗМ, 3 – КП, 4 – РК

Таблиця 3

Концентрація в мастильній оливі механічних домішок неорганічного походження (за масою)

Марка мастила	Концентрація механічних домішок, %		
	S = 80 %	S = 90 %	S = 100 %
Моторна олива М-10-$Г_2К$	0,7612	1,3899	2,1430
Трансмісійна олива ТАП-15	0,8453	1,5642	2,024

Лабораторні дослідження дали змогу визначити критичні значення електропровідності мастильної оливи, при яких її ступінь відпрацьованості досягає 100 %, враховуючи фактичний пробіг автотранспорту до заміни оливи в умовах сезонної експлуатації (табл. 4).

Таблиця 4

Бракувальні значення електропровідності мастильної оливи і терміни її служби ($t_м$ = 80 °С; S = 100 %)

Марка мастила	Бракувальні значення оливи σ, $Ом^{-1} \cdot м^{-1} \cdot 10^{10}$	Термін служби мастильної оливи, тис. км	Фактичний пробіг, тис. км			
			літо	осінь	зима	весна
Моторна олива М-10-$Г_2К$	6373,24	7,5	6,0	8,5	11,0	8,0
Трансмісійна олива ТАП-15	5772,4	15,0	14,2	16,0	17,5	16,5

Лабораторні дослідження показали, що для кожної мастильної оливи існують визначені допустимі рівні електропровідності (бракувальні значення). Коли електропровідність досягає цього порогового значення, зношення в елементах тертя різко зростає, що, у свою чергу, призводить до підвищення електропровідності. Це пов'язано зі значним збільшенням концентрації механічних домішок неорганічного походження (часток зношення) у мастильній оливі.

Висновки

Електропровідність може слугувати інтегральним бракувальним параметром для оцінки якості мастильної оливи. Бракувальний параметр відображає реальний стан якості мастильної оливи в силових агрегатах автотранспорту під час експлуатації з урахуванням забруднення частинками зношення.

Під час експлуатації автотранспорту в різні пори року та за різних погодних умов (дощ, туман, сніг) спостерігалися різні граничні значення електропровідності, що впливає на зміни фактичного пробігу автомобіля до потреби заміни оливи.

Одним з основних недоліків лабораторних досліджень є те, що забруднення оливи визначається за допомогою спеціалізованого лабораторного обладнання, що займає багато часу, чого не можна допускати для технологічного автотранспорту, яким необхідно продовжувати експлуатацію, поки очікуються результати аналізу.

Для покращення надійності силових агрегатів автотранспорту слід розробити мобільний бортовий пристрій для технічної діагностики, який автоматично, без участі водія, зможе оцінити стан мастильної оливи під час експлуатації транспортного засобу. Це є перспективним напрямом для подальших досліджень.

Список використаної літератури

1. Баглюк Г. А. Зносостійкі матеріали. Енциклопедія сучасної України / ред. кол.: І. М. Дзюба [та ін.]. НАН України, НТШ. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2001-2022. ISBN 966-02-2074-X.

2. Венцель Є. С. Бабенко А. О., Щукін О. В., Орел О. В. Інтенсивність зношування трибо вузлів машин в залежності від електропровідності змащувальної плівки. *Підйомно-транспортна техніка*, 2018. № 3(59). С. 15–19.

3. Дубінін Є. А. Молодан А. А., Степанов О. В. Кількісна оцінка надійності нових та відремонтованих автотракторних двигунів. *Вісник харківського державного технічного університету сільського господарства*. 2003. № 17. С. 18–20.

4. ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення.

5. Закалов О. В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.

6. Закалов, О. В. Триботехніка і підвищення надійності машин [Текст]: О. В. Закалов. Тернопіль : ТДТУ, 2000. 354 с.

7. М. В. Кондрачук, В. Ф. Хабутель М. І., Пашечко Є. В. Корбут. Трибологія. К. : Вид-во Національного Авіаційного університету «НАУ-друк», 2009. 232 с.

8. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. Д.:Східний видавничий дім, 2013. Т. 3. 644 с.

9. Полянський О. С., Степанов О. В. Підвищення надійності автосамоскидів застосуванням устрою пилового контролю в системі технічної діагностики. *Автомобільний транспорт*: зб. наук. тр. ХНАДУ. 2005. № 15. С. 55–60.

10. Попов. С. М. Антонюк Д. А., Нетребко В. В. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні : Навчальний посібник. Запоріжжя: ВАТ «Мотор Січ», 2010. 368 с.

11. Степанов О. В. Чинники, що впливають на надійність вантажного автомобіля під час роботи на породних відвалах. *Автомобільний транспорт*. № 13. 2003. С. 140–142.

References

1. Wear-resistant materials. Encyclopedia of Modern Ukraine / ed. by I.M. Dziuba [et al]. (2001–2022). Kyiv : Institute of Encyclopedic Studies of the National Academy of Sciences of Ukraine. ISBN 966-02-2074-X.

2. Ventsel E. S., Babenko A. O., Shchukin O. V., Orel O. V. (2018). Intensity of wear of tribo units of machines depending on the electrical conductivity of the lubricating film. *Lifting and transport equipment*, No. 3(59). P. 15–19.

3. Dubinin E. A., Molodan A. A., Stepanov O. V. (2003). Quantitative assessment of the reliability of new and repaired automotive tractor engines. *Bulletin of the Kharkiv State Technical University of Agriculture*. No. 17. P. 18–20.

4. DSTU 2823-94. Wear resistance of friction, wear and lubrication products. Terms and definitions.

5. Zakalov O. V. (2011). Fundamentals of friction and wear in machines: Study guide. Ternopil : TNTU Publishing House, P. 322.

6. Zakalov O. V. (2000). Tribotechnics and improvement of machine reliability [Text]: O. V. Zakalov. Ternopil : TSTU. P. 354.

7. Kondrachuk M. V., Khabutel M. I., Pasechko E. V. Korbut. Tribology. (2009). K. : National Aviation University Publishing House “NAU-druk”. P. 232.

8. Small Mining Encyclopedia : in 3 volumes / edited by V. S. Biletskyi. D. : Eastern Publishing House, 2013. V. 3. p. 644.

9. Polianskyi O. S., Stepanov O. V. (2005). Improving the reliability of dump trucks by using a dust control device in the technical diagnostics system. *Motor transport*: a collection of scientific works. KhNADU. No. 15. P. 55–60.

10. Popov. S. M. Antoniuk D. A., Netrebko V. V. (2010). Tribotechnical and material science aspects of fracture of steels and alloys during wear: Study guide. Zaporizhzhia: Motor Sich OJSC. P. 368.

11. Stepanov O. V. (2003). Factors influencing the reliability of a freight vehicle during work on waste heaps. *Automobile transport*. No. 13. P. 140–142.

УДК 629.5.036:62-192.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.36

В. І. ХОЛДЕНКО
старший викладач кафедри суднових енергетичних установок
та технічної експлуатації
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0003-0071-7055

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ СУДНОВИХ НАСОСІВ

Надійність функціонування суднових допоміжних систем безпосередньо залежить від ефективності діагностики насосного обладнання, яке забезпечує циркуляцію рідин, охолодження, змащення, перекачування палива та інших технологічних процесів. Актуальність дослідження зумовлена впровадженням концепцій автономного судноплавства та потребою в предиктивному обслуговуванні. Метою статті є системний аналіз існуючих методів діагностики суднових насосів, визначення їх переваг та обмежень в умовах морської експлуатації, а також формування прикладних рекомендацій щодо підвищення ефективності технічного моніторингу насосного обладнання. Методологія проведення дослідження передбачала критичний огляд літератури із подальшою класифікацією та порівняльним аналізом методів діагностики за критеріями точності, оперативності, адаптивності та інтеграції у суднові системи. Розглянуто як традиційні (вібраційний, тепловий, параметричний контроль тощо), так і сучасні підходи, зокрема методи на основі використання технологій штучного інтелекту. Результати дослідження продемонстрували, що жоден із методів не є універсальним, а кожен з них має обмеження в точності або пристосованості до морських умов. Найбільш перспективним є комбінований підхід із застосуванням багатосенсорного моніторингу та адаптивних алгоритмів аналізу. Запропоновано впровадження безперервного контролю на базі IoT-технологій, розробку регламентів діагностики та формування баз даних діагностичних ознак, що дозволить підвищити рівень превентивного обслуговування. Практична цінність результатів полягає у можливості їх використання при розробці систем технічного обслуговування суден, модернізації флотських нормативів та підготовці суднових механіків. Наукова новизна статті полягає у цільовому фокусі на насосному обладнанні як об'єкті діагностики та у виявленні напрямів для стандартизації, інтеграції та інтелектуалізації систем моніторингу. Запропоновані підходи можуть бути покладені в основу подальших досліджень щодо створення цифрових моделей технічного стану насосів у складі суднових допоміжних установок.

Ключові слова: *сенсорний моніторинг, вібраційна діагностика, суднові системи, машинне навчання, надійність, адаптивні алгоритми.*

V. I. KHOLDENKO
Senior Lector at the Ship Power Plants and Technical Operation Department
Merchant Marine Institute of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0003-0071-7055

ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DIAGNOSTIC OF SHIP PUMPS

The reliability of the operation of ship auxiliary systems directly depends on the effectiveness of the diagnostics of pumping equipment, which provides fluid circulation, cooling, lubrication, fuel pumping and other technological processes. The relevance of the study is due to the implementation of autonomous shipping concepts and the need for predictive maintenance. The purpose of the article is a systematic analysis of existing methods for diagnosing ship pumps, determining their advantages and limitations in marine operation, as well as the formation of applied recommendations for increasing the efficiency of technical monitoring of pumping equipment. The research methodology provided for a critical review of the literature, classification and comparative analysis of diagnostic methods according to the criteria of accuracy, efficiency, adaptability and integration into ship systems. Both traditional (vibration, thermal, parametric control) and modern approaches were considered, in particular, artificial intelligence methods. The results of the study showed that none of the methods is universal: each has limitations in accuracy or adaptability to marine conditions. The most promising is a combined approach using multi-sensor monitoring and adaptive analysis algorithms. The implementation of continuous monitoring based on IoT technologies, the development of diagnostic regulations and the formation of databases of diagnostic features are proposed, which will allow for an increase in the level of preventive maintenance. The practical value of the results lies in the possibility of their use in the development of ship maintenance systems, the modernization of fleet standards and the training of ship mechanics. The scientific novelty of the article lies in the targeted focus on pumping equipment as an object of diagnostics and in identifying areas for standardization, integration and intellectualization of monitoring systems. The proposed approaches can be used as the basis for further research on the creation of digital models of the technical condition of pumps as part of ship auxiliary installations.

Key words: *sensor monitoring, vibration diagnostics, ship systems, machine learning, reliability, adaptive algorithms.*

Постановка проблеми

Надійна експлуатація суднових допоміжних систем є критичним чинником забезпечення безпеки судноплавства й ефективності функціонування суден загалом. Однією з ключових складових таких систем є суднові насоси, які виконують функції циркуляції охолоджувальної рідини, перекачування палива, мастила, стічних і баластних вод. З огляду на їх безперервну роботу в складних морських умовах, насоси піддаються інтенсивному зносу, а відтак потребують постійного моніторингу технічного стану та своєчасної діагностики.

Сучасна практика технічного обслуговування демонструє, що відмова насоса нерідко спричиняє каскадні збої в інших системах судна, особливо в енергетичних установках, що, у свою чергу, може призвести до аварійної зупинки судна або небезпечних інцидентів [1, с. 350–351]. Таким чином, розробка та впровадження ефективних методів діагностики суднових насосів є не лише технічною задачею, але і питанням загальної суднової безпеки.

Актуальність проблеми підсилюється розвитком концепцій автономного судноплавства та Інтернету речей (IoT), що зумовлює появу нових вимог до діагностичних систем, а саме, інтеграцію інтелектуальних сенсорів і програмного забезпечення на основі машинного навчання [2]. Однак і ці інноваційні підходи поки що недостатньо апробовані в реальних судноплавних умовах та не стандартизовані для використання на флоті.

Крім того, існуючі методи нерідко виявляють відмови вже на стадії критичного зниження працездатності агрегата, що зменшує ефективність превентивного обслуговування. Саме тому питання точності, своєчасності та адаптивності діагностичних систем залишається відкритим. Наприклад, зміна умов експлуатації суттєво впливає на характер зношування насосів і потребує адаптивних моделей аналізу [3]. У цьому контексті постає необхідність систематизації існуючих методів діагностики суднових насосів, критичної оцінки їх переваг та обмежень, а також визначення перспективних напрямів удосконалення засобів контролю технічного стану насосного обладнання на морських суднах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У вітчизняній і зарубіжній науковій літературі накопичено значний масив досліджень, присвячених питанням діагностики та надійності суднових технічних систем. Зокрема, С. Тараненко та С. Голубєва розглянули використання логіко-ймовірнісного підходу «дерева відмов» для аналізу надійності електродвигунів, які є складовими насосних агрегатів, проте не охоплюють увесь спектр характеристик насоса як об’єкта діагностики [4]. Подібний фокус зберігається і в подальших публікаціях даних авторів, де головна увага приділена загальним показникам надійності електричних систем [5], що свідчить про відсутність комплексного підходу до аналізу насосів як окремої групи допоміжного обладнання.

Важливою спробою зміни парадигми аналізу суднових систем є робота Д. Курносенка, який досліджує методи оцінки технічного стану елементів системи мащення та трибосполучень [6]. Варто зазначити, що запропоновані в публікації методи залишаються орієнтованими на вузьке коло двигунних систем і потребують подальшої валідації для насосного обладнання.

У межах системного аналізу функціонування суднових допоміжних установок варто згадати дослідження К. Діонісіу (K. Dionysiou), В. Болбот (V. Bolbot) та Г. Теотокатоса (G. Theotokatos), які розробили функціонально-модульну модель для оцінки надійності мастильної системи круїзного судна [7]. Застосування такої моделі може бути ефективним і для насосних систем, проте наразі бракує емпіричних даних щодо її масштабованості та універсальності.

Актуальним напрямом є інтелектуальні системи на основі математичних моделей і машинного навчання. У цьому аспекті заслуговують на увагу праці О. Шарка (O. Sharko) та А. Яненка (A. Yanenko), які моделюють програмне забезпечення діагностики на базі ланцюгів Маркова [8]. Також слід відзначити дослідження Ю. Янга (Y. Yang) та ін., які узагальнили сучасні підходи до діагностики гідравлічних насосів, виокремивши три ключові напрями: методи аналізу сигналів, моделі з машинним навчанням і гібридні системи [9]. Їхні висновки узгоджуються з дослідженням С. Сюй (X. Xu) та ін., які вказують на необхідність стандартизації методів *fault diagnosis* для морських систем [10].

Щодо прогресу в області використання *data science*, то М. Пайонк (M. Pająk) та ін. доводять високий потенціал машинного навчання у виявленні несправностей дизельних двигунів суден [11]. Проте автори самі підкреслюють обмеження таких моделей з огляду на складність розмітки тренувальних вибірок. Оригінальним напрямом досліджень є роботи Я. Гіртлера (J. Girtler) та Я. Рудницького (J. Rudnicki), які вводять поняття «квантовості» в діагностиці теплових машин, зокрема двигунів внутрішнього згоряння [12].

Отже, проведений аналіз засвідчує, що існує очевидна прогалина в дослідженнях, присвячених безпосередньо діагностиці суднових насосів як окремої технічної одиниці. Дослідження здебільшого або фокусуються на двигунах, або застосовують методи загального призначення без глибокого аналізу їхньої ефективності в умовах морського середовища. Крім того, спостерігається відсутність комплексних досліджень, що поєднували б фізичне моделювання, сенсорний моніторинг і штучний інтелект (далі ШІ).

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є системний аналіз існуючих методів діагностики суднових насосів і формування практичних рекомендацій щодо удосконалення підходів до технічного моніторингу насосного обладнання на суднах. Для досягнення поставленої мети в межах статті вирішуються такі основні завдання:

1. Дослідити типові методи діагностики, які застосовуються в практиці технічного обслуговування суднових насосів.
2. Проаналізувати переваги та недоліки методів діагностики судових насосів у контексті умов експлуатації на флоті, враховуючи критерії точності, оперативності, адаптивності та технологічної інтеграції.
3. Запропонувати рекомендації щодо вдосконалення діагностики суднових насосів для підвищення ефективності превентивного технічного обслуговування у складі суднових допоміжних систем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Технічне обслуговування суднових насосів спирається на широкий спектр методів контролю їх стану. Зокрема, використовуються різноманітні сенсорні методи моніторингу параметрів, серед яких найпоширенішими є вібраційна діагностика, а також контроль температури, тиску, витрати робочого середовища тощо [9].

Вібраційний аналіз наразі визнаний ключовим інструментом для раннього виявлення механічних дефектів насосів (небаланс, знос підшипників тощо) та є найбільш розповсюдженим видом діагностики насосного агрегату. Це пояснюється тим, що при зародженні несправності внутрішніх частин насоса змінюються динамічні характеристики вузлів, що відображається у вібраційних сигналах. Обробляючи ці сигнали методами спектрального чи часово-частотного аналізу, можна виокремити ознаки дефекту та оцінити його розвиток. У таблиці 1 наведено узагальнену класифікацію типових методів діагностики суднових насосів, виявлених у науковій літературі.

Таблиця 1

Систематизація методів діагностики суднових насосів

Метод	Суть методу
Вібраційна діагностика	Аналіз коливань для виявлення механічних дефектів
Акустична діагностика	Виявлення кавітації та аномальних шумів
Тепловий контроль	Контроль температури вузлів для виявлення перегріву
Моніторинг тиску/витрати	Оцінка ефективності роботи за зміною параметрів подачі
Електрична сигнатура	Аналіз споживаного струму для виявлення змін у навантаженні
Аналіз робочої рідини	Виявлення зносу за домішками в мастилі чи рідині
Використання ШІ	Автоматичне розпізнавання дефектів на основі сенсорних даних

Джерело: узагальнено автором на основі аналізу [2; 3; 4; 9; 13; 14; 15].

Останніми роками з'явилися прототипи багатосенсорних систем діагностики, які об'єднують дані різних датчиків. Зокрема, в статті Дж. Лі [3] продемонстровано експериментальний стенд для масляного насоса, де паралельно збиралися дані тиску, витрати, температури, вібрацій і шуму. Такий комплексний підхід забезпечив формування розширеної бази даних діагностичних ознак для різних режимів і сценаріїв відмов. Таким чином, літературні джерела описують цілу низку методів, які можуть застосовуватися для діагностики насосів, але кожен з них має свої сильні сторони та обмеження, що потребує детальнішого аналізу в контексті експлуатації на флоті.

Для критичної оцінки розглянутих підходів проведено їх порівняння за ключовими критеріями ефективності, важливими в умовах експлуатації суден, а саме: точність виявлення несправностей, оперативність (своєчасність) діагностики, адаптивність і можливість інтеграції в існуючу суднову систему моніторингу. Результати такого порівняльного аналізу наведено у таблиці 2. Відзначимо, що оцінка носить якісний характер (висока/середня/низька) на основі узагальнення даних літератури та практичного досвіду.

Таблиця 2

Порівняння діагностичних методів за основними критеріями

Метод	Точність	Оперативність	Адаптивність	Інтеграція
Вібраційна діагностика	Висока	Середня	Помірна	Помірна
Акустична діагностика	Середня	Висока	Низька	Помірна
Тепловий контроль	Низька	Низька	Помірна	Висока
Контроль тиску/витрати	Середня	Середня	Низька	Висока
Електрична сигнатура	Помірна	Висока	Помірна	Висока
Аналіз робочої рідини	Середня	Низька	Низька	Низька
Модельно-аналітичний	Висока	Висока	Низька	Низька
Методи ШІ	Висока	Висока	Помірна	Помірна

Джерело: узагальнено автором на основі аналізу [2; 3; 4; 9; 13; 14; 15].

Жоден окремий метод не забезпечує одночасно максимум точності, швидкості й універсальності в умовах експлуатації на флоті. Вібраційна діагностика вирізняється високою чутливістю і достатньою оперативністю, проте вимагає стабільних режимів роботи та може давати хибні спрацьовування за наявності сторонніх вібрацій. Методи, що базуються на контролі експлуатаційних параметрів насоса (тиску, витрати), легко інтегруються у штатні системи судна, але вони найчастіше фіксують уже суттєве відхилення характеристик, коли несправність розвинута. Тепловий контроль простий у реалізації, однак служить запізнілим індикатором проблем (наприклад, підвищення температури підшипника відбувається вже при значному його зносі). Аналіз струмової споживаної потужності електропривода перспективний із точки зору реалізації у судновій електроніці, але точність його обмежена складністю виділення потрібних ознак із електричного сигналу (необхідне застосування фільтрів, трансформування сигналу в частотну площину тощо).

Адаптивність діагностичних засобів є особливо важливою для морських умов, оскільки режими роботи насосів на судні можуть змінюватися залежно від навантаження, стану моря, температури забортної води та інших чинників. Багато традиційних алгоритмів аналізу сигналів є недостатньо гнучкими, наприклад, методи прямої обробки тимчасового сигналу можуть давати збої при несталих режимах або сильно зашумлених даних [9].

Методи на основі ШІ частково вирішують цю проблему, дозволяючи перенавчати модель або застосовувати алгоритми, стійкі до змінних умов роботи. Однак і такі методи потребують достатнього обсягу репрезентативних даних для навчання та подальшого використання.

Додатково проаналізовано специфічні переваги й обмеження методів у контексті експлуатації на морі, що узагальнено в таблиці 3. При цьому було акцентовано прикладні аспекти, зокрема, враховано чинники суднової експлуатації (вібрація корпусу судна, рівень шуму, кваліфікація обслуговуючого персоналу, доступність обладнання тощо) та їхній вплив на ефективність кожного з методів.

Таблиця 3

Переваги та обмеження методів діагностики насосів у флотських умовах

Метод	Переваги	Обмеження
Вібраційна діагностика	Раннє виявлення механічних дефектів, дистанційний контроль	Чутливість до фонового шуму та вібрацій корпусу судна
Акустична діагностика	Швидка фіксація кавітації, ударів	Високий рівень шуму в машинному відділенні
Тепловий контроль	Простота реалізації; вже наявні сенсори	Пізнє реагування; залежність від зовнішньої температури
Контроль тиску/витрати	Безперервний штатний моніторинг	Неможливість точно локалізувати дефект
Електрична сигнатура	Інтегрується в систему управління двигуном	Потребує складної інтерпретації електричних сигналів
Аналіз робочої рідини	Виявляє знос за продуктами деградації	Потребує зупинки насоса, лабораторного аналізу
Модельно-аналітичний	Прогнозування стану; індивідуальне моделювання	Складність реалізації і високі вимоги до обчислювальних ресурсів
Методи ШІ	Автоматичне розпізнавання дефектів; працюють у реальному часі	Необхідність великих масивів даних і фахового супроводу

Джерело: авторська розробка.

Умови експлуатації на морі суттєво впливають на ефективність діагностичних методів. Зокрема, завадостійкість виходить на перший план, оскільки висока віброактивність та акустичний шум на діючому судні можуть маскувати прояви несправностей. Крім того, оперативність діагностики обмежується необхідністю зупинки насоса для проведення деяких видів контролю (наприклад, відбір мастила на аналіз або ручна віброметрія портативними приладами під час стоянки). Отже, методи, що потребують мінімального втручання в роботу обладнання і можуть працювати онлайн, мають перевагу з точки зору флотських умов. Водночас, такі методи повинні бути достатньо надійними та простими в інтеграції, аби екіпаж міг їм довіряти.

Враховуючи виявлені сильні та слабкі сторони означених методів, сформульовано рекомендації для підвищення ефективності діагностики суднових насосів. Вони спрямовані на комбінування методик із метою покриття сліпих зон кожної з них, підвищення своєчасності виявлення відмов та адаптації систем діагностики до умов експлуатації. Узагальнений перелік пропозицій викладено в таблиці 4.

Таблиця 4

Рекомендації щодо вдосконалення діагностики суднових насосів

Напрям	Опис
Комплексний моніторинг на основі кількох методів	Поєднання вібрації, тиску та температури для підвищення достовірності діагностики
Впровадження безперервного моніторингу (IoT)	Смарт-сенсори для збору та передачі даних у реальному часі
Розробка адаптивних алгоритмів діагностики (адаптивні алгоритми ШІ)	Самоналаштування під змінні режими роботи насоса
Інтеграція діагностики в систему техобслуговування	Регламенти, навчання екіпажу, створення бази діагностичних ознак

Джерело: авторська розробка.

Запропоновані заходи мають на меті створити більш надійну та проактивну систему контролю стану суднових насосів. Реалізація наведених рекомендацій сприятиме підвищенню надійності суднових допоміжних систем, мінімізації імовірності раптових відмов насосів і, як наслідок, зміцненню загальної безпеки й ефективності експлуатації флоту.

Висновки

Забезпечення надійної і безперервної роботи суднових насосів є критично важливою умовою стабільного функціонування допоміжних систем судна. Враховуючи високий ступінь зношування насосного обладнання в умовах експлуатації на флоті, актуальність дослідження методів їх діагностики не викликає сумнівів. Існуюча наукова та технічна база демонструє значну увагу до станового моніторингу головних енергетичних установок, натомість діагностика суднових насосів досі лишалася фрагментарною та недостатньо структурованою.

Надійність суднових насосів є ключовою умовою ефективної роботи допоміжних систем судна, що обумовлює актуальність пошуку оптимальних методів їх діагностики. Проведене дослідження дозволило систематизувати наявні підходи від вібраційної і теплової діагностики до методів на основі ШІ та цифрового моделювання. Встановлено, що кожен із методів має обмеження, а найефективнішим вбачається їх комбіноване застосування.

Отримані результати показали, що інтеграція сенсорного моніторингу, адаптивних алгоритмів і безперервного збору даних сприяє переходу до предиктивного обслуговування насосів. Запропоновані підходи та сформовані рекомендації можуть бути використані для вдосконалення регламентів техобслуговування, розробки суднових систем моніторингу та підготовки технічного персоналу.

Наукова новизна дослідження полягає у фокусі на суднових насосах як окремому об’єкті діагностики з урахуванням специфіки морських умов. Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення репрезентативних датасетів і стандартизацію комбінованих діагностичних рішень для суден різних класів.

Список використаної літератури

1. Мельник О., Сорока В. Вібродіагностика головної енергетичної установки суден: вдосконалення та інтеграція методів. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2023. № 47. С. 349–359. URL: https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121 (дата звернення: 20.05.2025).

2. Cabuk A. Experimental IoT study on fault detection and preventive apparatus using Node-RED ship’s main engine cooling water pump motor. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 138. Article 106310. URL: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106310 (дата звернення: 20.05.2025).

3. Investigation of failure causes of oil pump based on operating conditions / J.-J. Lee et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 7. Article 4308. URL: https://doi.org/10.3390/app13074308 (дата звернення: 20.05.2025).

4. Тараненко С., Голубєва С. Використання «дерева відмов» як логіко-ймовірнісного методу аналізу суднових електродвигунів. *Транспортні системи і технології*. 2022. № 40. С. 149–158. URL: https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13 (дата звернення: 20.05.2025).

5. Тараненко С., Голубєва С. Аналіз показників надійності суднових електродвигунів, що використовуються у сучасному судновому обладнанні. *Водний транспорт: Збірник наукових праць*. 2021. № 2(33). С. 5–12. URL: https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/165/129 (дата звернення: 20.05.2025).

6. Курносенко Д. Методи дослідження параметрів працездатності елементів системи мащення та трибосполучень суднових двигунів внутрішнього згоряння. *ІІ Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету (MPP&O-2020 (Marine Power Plants and Operation), квітень 2020): матеріали*. Одеса: Одеський національний морський університет, 2020. С. 151–155. URL: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19286.40006 (дата звернення: 20.05.2025).

7. Dionysiou K., Bolbo, V., Theotokatos G. A functional model-based approach for ship systems safety and reliability analysis: Application to a cruise ship lubricating oil system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2022. Vol. 236. No. 1. P. 228–244. URL: https://doi.org/10.1177/14750902211004204 (дата звернення: 20.05.2025).

8. Sharko O., Yanenko A. Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Science-intensive technologies*. 2023. Vol. 3. No. 59. P. 251–261. URL: https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946 (дата звернення: 20.05.2025).

9. Current status and applications for hydraulic pump fault diagnosis: A review / Y. Yang et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22. No. 24. Article 9714. URL: https://doi.org/10.3390/s22249714 (дата звернення: 20.05.2025).

10. Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems / X. Xu et al. *Transportation Safety and Environment*. 2021. Vol. 3. No. 2. P. 85–102. URL: https://doi.org/10.1093/tse/tdab005 (дата звернення: 20.05.2025).

11. Ship diesel engine fault diagnosis using data science and machine learning / M. Pająk et al. *Electronics*. 2023. Vol. 12. No. 18. Article 3860. URL: https://doi.org/10.3390/electronics12183860 (дата звернення: 20.05.2025).

12. Girtler J., Rudnicki J. Quantumness in diagnostics of marine internal combustion engines and other ship power plant machines. *Polish Maritime Research*. 2023. No. 4. P. 110–119. URL: https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0064 (дата звернення: 20.05.2025).

13. Adamkiewicz A., Nikończuk P. An attempt at applying machine learning in diagnosing marine ship engine turbochargers. *Eksploatacja i Niezawodność*. 2022. Vol. 24. No. 4. P. 795–804. URL: http://doi.org/10.17531/ein.2022.4.19 (дата звернення: 20.05.2025).

14. Кононенко А., Слабко В. Реалізація неперервної освіти в процесі формування професійної компетентності майбутніх суднових механіків. *Науковий часопис. Серія 5. Педагогічні науки: реалії та перспективи*. 2024. № 101. С. 20–25. URL: https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04 (дата звернення: 20.05.2025).

15. Чимшир В. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: колективна монографія. Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА», 2020. 472 с. URL: https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf (дата звернення: 20.05.2025).

References

1. Melnyk, O., & Soroka, V. (2023). Vibrodiahnostyka holovnoi enerhetychnoi ustanovky suden: vdoskonalennia ta intehratsiia metodiv. [Vibration diagnostics of ship main power plants: improvement and integration of methods]. *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky – Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, no. 47, pp. 349–359. Retrieved from https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121 [in Ukrainian].

2. Cabuk, A. (2022). Experimental IoT study on fault detection and preventive apparatus using Node-RED ship's main engine cooling water pump motor. *Engineering Failure Analysis*, vol. 138, article 106310. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106310

3. Lee, J.-J., Kim, Y., Lee, T., Kim, M.-S., Kim, J.-H., Tak, H.-J., Park, J.-W., & Oh, D. (2023). Investigation of failure causes of oil pump based on operating conditions. *Applied Sciences*, vol. 13, no. 7, article 4308. Retrieved from https://doi.org/10.3390/app13074308

4. Taranenko, S., & Holubeva, S. (2022). Vykorystannia «dereva vidmov» yak lohiko-ymovirnisnoho metodu analizu sudnovykh elektrodyhunikiv. [Use of «fault tree» as a logical-probabilistic method for analyzing ship electric motors]. *Transportni systemy i tekhnolohii – Transport Systems and Technologies*, no. 40, pp. 149–158. Retrieved from https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-13 [in Ukrainian].

5. Taranenko, S., & Holubeva, S. (2021). Analiz pokaznykiv nadiinosti sudnovykh elektrodyhunikiv, shcho vykorystovuiutsia u suchasnomu sudnovomu obladnanni. [Analysis of reliability indicators of ship electric motors used in modern ship equipment]. *Vodnyi transport: Brink naukovykh prats – Water Transport: Collection of Scientific Papers*, no. 2 (33), pp. 5–12. Retrieved from https://vt.duit.in.ua/index.php/home/article/view/165/129 [in Ukrainian].

6. Kurnosenko, D. (2020). Metody doslidzhennia parametriv pratsiezdatnosti elementiv systemy mashchennia ta trybospoluchen sudnovykh dvhunikiv vnutrishnoho zhorannia. [Methods for studying the performance parameters of marine diesel engine lubrication systems and tribocouplings]. *Materialy II Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi morskoyi konferentsiyi kafedry SEU i TE ONMU, kviten 2020. Odesa: ONMU – Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of SEU and TE of ONMU, April 2020. Odesa: ONMU*, pp. 151–155. Retrieved from https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19286.40006 [in Ukrainian].

7. Dionysiou, K., Bolbot, V., & Theotokatos, G. (2022). A functional model-based approach for ship systems safety and reliability analysis: Application to a cruise ship lubricating oil system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 236, no. 1, pp. 228–244. Retrieved from https://doi.org/10.1177/14750902211004204

8. Sharko, O., & Yanenko, A. (2023). Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Science-intensive technologies*, vol. 3, no. 59, pp. 251–261. Retrieved from https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946

9. Yang, Y., Ding, L., Xiao, J., Fang, G., & Li, J. (2022). Current status and applications for hydraulic pump fault diagnosis: A review. *Sensors*, vol. 22, no. 24, article 9714. Retrieved from https://doi.org/10.3390/s22249714

10. Xu, X., Yan, X., Yang, K., Zhao, J., Sheng, C., & Yuan, C. (2021). Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems. *Transportation Safety and Environment*, vol. 3, no. 2, pp. 85–102. Retrieved from https://doi.org/10.1093/tse/tdab005

11. Pająk, M., Kluczyk, M., Muślewski, Ł., Lisjak, D., & Kolar, D. (2023). Ship diesel engine fault diagnosis using data science and machine learning. *Electronics*, vol. 12, no. 18, article 3860. Retrieved from https://doi.org/10.3390/electronics12183860

12. Girtler, J., & Rudnicki, J. (2023). Quantumness in diagnostics of marine internal combustion engines and other ship power plant machines. *Polish Maritime Research*, vol. 4, pp. 110–119. Retrieved from https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0064

13. Adamkiewicz, A., & Nikończuk, P. (2022). An attempt at applying machine learning in diagnosing marine ship engine turbochargers. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, vol. 24, no. 4, pp. 795–804. Retrieved from https://doi.org/10.17531/ein.2022.4.19

14. Kononenko, A., & Slabko, V. (2024). Realizatsiia neperervnoi osvity v protsesi formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh sudnovykh mekhanikiv. [Implementation of lifelong learning in the process of developing professional competence of future ship engineers]. *Naukovyi chasopys. Seriia 5. Pedahohichni nauky: realii ta perspektyvy – Scientific Journal. Series 5. Pedagogical Sciences: Realities and Perspectives*, no. 101, pp. 20–25. Retrieved from https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04 [in Ukrainian].

15. Chymshyr, V. (2020). Suchasni pidkhody do vysokoeffektyvnoho vykorystannia zasobiv transportu: kolektyvna monohrafiia. [Modern approaches to the efficient use of transport means: collective monograph]. Izmayil: DI NU "OMA" – Izmail: DINU "OMA". Retrieved from https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf [in Ukrainian].

ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 687.016:687.03 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.37

О. В. БЛАГОДИР
аспірант
Хмельницький національний університет
ORCID: 0009-0001-7053-3465

Т. А. НАДОПТА
кандидат технічних наук,
доцент кафедри індустрії моди в легкій промисловості
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0002-9338-7827

АНАЛІЗ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ РОЗКРОЮ РУЛОННИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті розглядаються методи оптимізації розкрою рулонних матеріалів на підприємствах легкої промисловості як один із ключових факторів, що впливають на ефективність виробництва.

Правильний підхід до планування розкрою на підприємствах дозволяє ефективно використовувати сировину, мінімізувати відходи та збільшити прибуток за рахунок зниження виробничих витрат. Використання сучасного програмного забезпечення дає змогу точніше прогнозувати витрати матеріалів, що забезпечує стабільну роботу підприємства та взаємодію з постачальниками сировини.

Оптимізація процесу розкрою підвищує конкурентоспроможність, даючи змогу гнучкіше адаптувати виробництво до змін на ринку, що особливо актуально в умовах сучасної економіки. Взаємозв'язок між продуктивністю виробництва та рівнем відходів передбачає поєднання кількох методів розкрою, застосування передових технологій та спеціалізованого програмного забезпечення на підприємствах легкої промисловості дозволяє досягти балансу між ефективністю використання матеріалів та якістю готової продукції.

Перспективним напрямом подальших досліджень у цій галузі є вдосконалення алгоритмів оптимізації розкрою, зокрема використання комп'ютерного зору для аналізу матеріалів перед розкроєм та штучного інтелекту для аналізу цих даних. Це дозволить планувати оптимальну схему розкрою та автоматично налаштовувати комплекс розкрою для роботи з конкретним матеріалом без втручання людини, що виключає можливість помилок при налаштуванні обладнання.

На основі проведених досліджень можна стверджувати, що оптимізація розкрою рулонних матеріалів на підприємствах легкої промисловості є критично важливим чинником підвищення ефективності роботи підприємства. Сучасні комплекси розкрою дозволяють підвищити ефективність завдяки точності. Отже, поєднання інноваційних технологій, точного моделювання та автоматизації сприятиме розвитку цього напряму.

Ключові слова: *розкрій матеріалів, планування розкрою, оптимізація розкрою, методи розкрою, CAD/CAM системи, зменшення відходів.*

O. V. BLAHODYR
Postgraduate Student
Khmelnytskyi National University
ORCID: 0009-0001-7053-3465

T. A. NADOPTA
Ph.D. in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Fashion Industry in Light Industry
Khmelnytskyi National University
ORCID: 0000-0002-9338-7827

ANALYSIS OF SYSTEMS AND METHODS FOR CUTTING ROLLED MATERIALS IN THE LIGHT INDUSTRY

The article discusses methods for optimizing the cutting of rolled materials in light industry enterprises, as one of the key factors influencing production efficiency. A proper approach to cutting planning in enterprises allows for effective use of raw materials, minimizes waste, and increases profits by reducing production costs. The use of

modern software enables more accurate forecasting of material consumption, ensuring stable operation of the enterprise and interaction with raw material suppliers.

Optimizing the cutting process enhances competitiveness by allowing more flexible adaptation of production to market changes, which is particularly important in today's economy. The relationship between production productivity and waste levels involves a combination of several cutting methods; the application of advanced technologies and specialized software in light industry enterprises allows achieving a balance between material utilization efficiency and the quality of finished products.

A promising direction for further research in this area is the improvement of cutting optimization algorithms, specifically the use of computer vision for analyzing materials before cutting and artificial intelligence for analyzing this data. This information will enable planning an optimal cutting scheme and automatically adjusting the cutting complex to work with this specific material without human intervention, thus eliminating the possibility of errors when configuring equipment settings.

Based on the conducted research, it can be stated that optimizing the cutting of rolled materials in light industry enterprises is a critically important factor in enhancing enterprise efficiency. Modern cutting complexes allow for increased cutting efficiency through improved accuracy. Thus, the combination of innovative technologies, precise modeling, and automation will enable the development of this direction.

Key words: *Material cutting, cutting planning, cutting optimization, cutting methods, CAD/CAM systems, waste reduction.*

Постановка проблеми

В наш час індустрія моди стикається з великою кількістю проблем, зокрема, через зростаючу популярність відповідального споживання, багато покупців стають свідомими і вимагають екологічної відповідальності від виробників. Оскільки, виробництво матеріалів для виготовлення одягу та взуття вимагає велику кількість ресурсів таких як вода, електроенергії та хімікатів, потрібно шукати рішення для більш ефективного використання матеріалів.

Як відомо, основним фактором, який впливає на ефективність використання матеріалів, є розкрій, саме процес розкрою безпосередньо визначає рівень відходів, собівартість виробництва та загальну економічну ефективність. Сучасні системи управління процесом розкрою рулонних матеріалів для виробів легкої промисловості відіграють одну з найважливіших ролей у ефективності підприємства. Однак вибір між ручними та автоматизованими методами розкрою матеріалів є актуальним для багатьох підприємств легкої промисловості, так як ручний метод розкрою матеріалу поширений через простоту, гнучкість виробництва та невеликі витрати на обладнання, але цей метод зазвичай має обмеження щодо точності та продуктивності. Автоматизовані системи, навпаки, забезпечують високу точність та швидкість, але вимагають значних капіталовкладень в обладнання, програмне забезпечення, навчання персоналу, складне налаштування під різні типи матеріалів, крім того, сучасне програмне забезпечення дозволяє мінімізувати відходи матеріалів автоматично розміщуючи деталі крою для найбільш ефективного використання матеріалу.

Основна проблема полягає у тому що необхідно досягнути максимального використання матеріалу за мінімальний відрізок часу, при мінімальному використанні ресурсів що особливо актуально при постійному зростанні вартості енергоресурсів. Не ефективний розкрій призводить не тільки до втрат матеріалів а й збільшує відходи та додаткові витрати на утилізацію цих відходів.

Таким чином, вибір між ручними та автоматизованими методами розкрою є важливим фактором що безпосередньо впливає на продуктивність і ефективність підприємства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процес розкрою матеріалів на підприємствах легкої промисловості охоплює широкий спектр методів та технологій, у час коли вартість матеріалів складає левову частку собівартості продукції необхідно впроваджувати технологічні рішення які будуть допомагати максимально ефективно використовувати матеріали, це зменшить кількість відходів які потрібно буде утилізувати, зменшить витрати на доставку матеріалів, знизить собівартість продукції в цілому.

Як відомо [1], щоб забезпечити ефективний розкрій матеріалів усі матеріали мають бути перевірені на відсутність пошкоджень та інших дефектів, які можуть виникнути під час транспортування матеріалу, наприклад наявність бруду, механічних пошкоджень чи води. Матеріали мають бути перевірені на відсутність заводського браку а також на відповідність кольору і відтінку матеріалу.

При плануванні робочих процесів у розкрійному цеху необхідно враховувати кілька основних параметрів, що впливають на продуктивність і ефективність роботи. Основними з них є кількість виробів, замовлених для кожного розміру фасону, технологічні обмеження процесів розкладки та розкрою, максимальне використання тканини та забезпечення найкращого використання часу та праці [2].

Автори [3, 4] виокремлюють два типи розкрою матеріалів легкої промисловості: механізований та автоматизований. Механізований – виконується універсальним чи спеціальним інструментом шляхом деформування і розклинення матеріалу різальним інструментом. Автоматизований – використання спеціального обладнання та

програмного забезпечення для автоматичного розкрою матеріалів, у більшості випадків автоматизований розкрій виконують на автоматизованих розкрійних комплексах які є єдиною системою з автоматизованим настильним комплексом. Однак, наведена класифікація потребує більш детального розгляду, оскільки вона не враховує всіх можливих аспектів та викликає певні зауваження.

Автоматизовані системи розкрою мають ряд переваг над механізованими, не зважаючи на високу продуктивність, швидкість і якість крою, автоматизовані системи розкрою рулонних матеріалів можуть мати систему автоматичного настилання матеріалу за допомогою напівавтоматичних чи автоматизованих настильних комплексів, в яких програмується довжина настилу, кількість шарів, автоматично подається матеріал та контролюється натяг полотна [5]. Також великою перевагою автоматизованих систем є те що більшість сучасних автоматичних розкрійних комплексів володіють інтелектуальною системою вибору оптимального шляху розкрою матеріалу, автоматичну систему змащування і заточки ножа [6].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз сучасних систем управління процесом розкрою рулонних матеріалів для підприємств легкої промисловості, характеристика їх технічних можливостей та ефективності застосування. Особливу увагу буде приділено порівнянню ручних та автоматизованих методів розкрою, оцінці їх продуктивності, використання ресурсів та економічну доцільність. На основі проведеного аналізу буде сформульовано рекомендації щодо вибору оптимального підходу до розкрою для підприємств різного типу та розміру виробництва.

Викладення основного матеріалу дослідження

Правильне планування розкрою матеріалів на підприємствах легкої промисловості відіграє важливу роль у сучасному виробництві, оскільки воно дозволяє вирішувати цілий ряд важливих завдань. По-перше, воно забезпечує можливість організувати поставки матеріалів заздалегідь, що дозволяє скористатися більш вигідними цінами та уникнути дефіциту під час підвищення попиту. По-друге, воно гарантує наявність достатньої кількості матеріалів для безперебійної роботи підприємства, що є критично важливим для підтримання високого рівня виробництва та якості продукції.

Таке планування дозволяє підприємствам уникнути багатьох труднощів як логістичних та і фінансових, затримки у виробництві через відсутність необхідних матеріалів, а також надмірні витрати на аварійні закупівлі за підвищеними цінами. Крім того, воно сприяє оптимізації використання ресурсів та зниженню відходів, що має позитивний вплив на собівартість продукції і кількості відходів які підлягають утилізації. Таким чином, ефективне планування розкрою матеріалів є важливим інструментом для забезпечення стабільності та конкурентоспроможності підприємства на ринку.

В сучасному виробництві існує широкий спектр методів розкрою матеріалів, які застосовуються залежно від типу виробництва, розміру підприємства та типу матеріалу, що підлягає розкрою. Ця різноманітність дозволяє вибирати найбільш оптимальний підхід до розкрою матеріалів, який більше відповідає потребам та умовам конкретного підприємства.

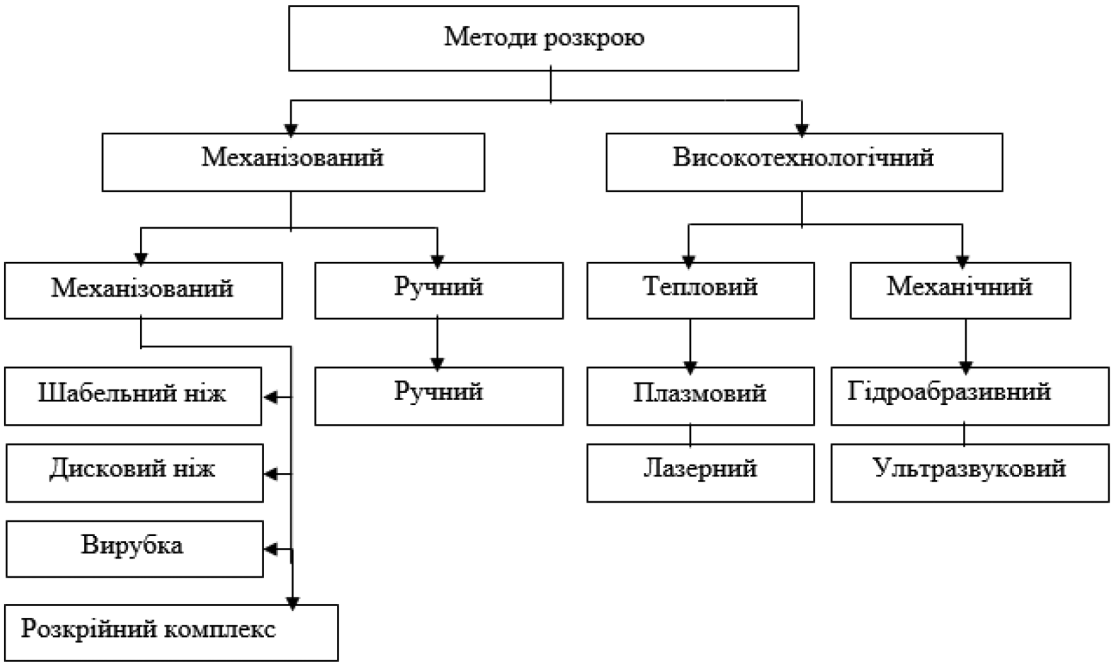


Рис. 1. Схема методів розкрою матеріалів

Механічний розкрій – є одним з найпоширеніших методів розкрою матеріалів оскільки він є найбільш доступним та простим у використанні для малих підприємств або індивідуального пошиву. До механічного розкрою можна віднести такі методи розкрою:

– Розкрій ручним способом – широко використовується на малих підприємствах, підприємствах з частою зміною модельного ряду, в ательє та при індивідуальному пошиві. Цей метод забезпечує високу гнучкість та можливість швидко адаптуватися до змін у виробництві. Ручний розкрій дозволяє точно контролювати процес крою матеріалів, забезпечити мінімальні відходи що особливо важливо при роботі з дорогими або дефіцитними матеріалами. Перевагами цього методу є те що він гнучкий у використанні – так як інструменти можуть бути адаптовані до різних видів матеріалів від тканин до штучної шкіри чи текстильних матеріалів. До недоліків можна віднести точність і якість, механічний розкрій не завжди може забезпечити таку ж високу точність як автоматизовані чи комп'ютеризовані системи.

– Розкрій шабельними ножами – широко застосовується на швейних підприємствах, особливо на малих підприємствах де відбувається пошив малими партіями чи ательє де відбувається пошив за індивідуальним замовленням. Цей метод забезпечує високу маневреність та ефективність у процесі розкрою матеріалів, перевагами цього методу є висока маневреність та ефективність, так як дозволяють розкроїти велику кількість деталей за короткий час за рахунок великої кількості настилів. До недоліків можна віднести точність, хоча шабельні ножі дозволяють обробляти складні форми, ширина лінії розрізання становить 1.5–2 мм, що іноді може спричинити обсипання зрізів на деяких матеріалах, та вимагає необхідність в кваліфікованому персоналі.

– Розкрій дисковими ножами – широко застосовується на швейних підприємствах, особливо на малих підприємствах де відбувається пошив малими чи середніми партіями, перевагами цього методу є висока швидкість та точність розкрою, ще однією перевагою цього методу є зручність у користуванні, завдяки компактній конструкції дискові ножі зручні у використанні в промислових і домашніх умовах.

Недоліками є обмеження по товщині матеріалів, вони більше підходять для матеріалів середньої товщини, та складність роботи з криволінійними зрізами, краще для прямолінійного крою.

– Вирубка – широко використовується для масового виробництва у легкій промисловості, та металургійній галузі. Він передбачає використання різаків або ножів, які встановлюються на пресовий механізм для вирубування деталей із рулонних або листових матеріалів. Перевагами такого методу є точність і повторюваність розкрою декількох настилів матеріалу із мінімальними відходами, що особливо важливо при масовому виробництві. Недоліками такого методу є висока вартість обладнання, вартість виготовлення різаків (ножів), розміщення пресового обладнання вимагає спеціальних умов для безпечної експлуатації.

– Розкрійні комплекси – широко використовуються на різних типах виробництва для розкрою багатошарових настилів тканин, текстильних та синтетичних матеріалів. Перевагами цього методу є висока точність, автоматизація процесу, що суттєво підвищує продуктивність та ефективність праці. Недоліками такого методу є висока вартість обладнання, вимагає необхідність в кваліфікованому персоналі.

Порівняльна характеристика перелічених вище методів розкрою матеріалів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика механічних методів розкрою матерів

Метод	Продуктивність	Точність	Вартість	Гнучкість
Ручний	Низька	Середня	Низька	Висока
Шабельний ніж	Висока	Висока	Середня	Обмежена
Дисковий ніж	Середня	Висока	Середня	Обмежена
Вирубка	Дуже висока	Висока	Висока	Низька
Розкрійні комплекси	Максимальна	Дуже висока	Дуже висока	Обмежена

Лазерний розкрій – це високотехнологічний метод розкрою матеріалів, який використовує лазерний промінь для різання різних матеріалів. Перевагами методу є те що лазерний промінь дозволяє створювати складні форми та контури, що складно досягти іншими методами розкрою, використання лазерного розкрою дозволяє підприємствам легкої промисловості автоматизувати процеси розкрою що підвищує продуктивність, знижувати витрати на заробітну плату працівникам та покращувати якість продукції за рахунок зменшення впливу людського фактора. Ще одним фактором є те що при розкрою лазерним променем відбувається оплавлення країв деталей що запобігає їхньому обсипанню. До недоліків такого методу можна віднести собівартість обладнання, вартість обслуговування обладнання, робота з таким обладнанням вимагає певних навичок та знань тому вимагає необхідність в кваліфікованому персоналі, в деяких випадках обпалення країв є недопустимим для деяких деталей.

Гідроабразивний розкрій – є високотехнологічним методом розкрою матеріалів, який використовує потік води під високим тиском для різання різних матеріалів. Перевагами методу є те, що водоструминний потік як і лазерний розкрій дозволяє створювати складні форми та контури, але на відмінну від лазерного розкрою не відбувається

нагрів матеріалу, що важливо для тих матеріалів які можуть деформуватись під впливом високої температури, крім того цей метод не викликає обсипання країв деталей, оскільки вода не пошкоджує матеріал під час різання. До недоліків цього методу можна віднести собівартість обладнання, вартість обслуговування обладнання, робота з цим обладнанням вимагає певних навичок та знань тому вимагає необхідність в кваліфікованому персоналі, для деяких матеріалів відсутність обпалення країв може бути недоліком, оскільки оплавлення іноді використовується для обробки краю чи запобігання обсипанню матеріалів.

Ультразвуковий розкрій – є сучасним методом розкрою матеріалів, який використовує високочастотні звукові хвилі для різання різних матеріалів. Цей метод набув широкого застосування у різних галузях промисловості завдяки своїй точності та ефективності. Ультразвуковий розкрій як лазерний і гідроабразивний методи має можливість створювати складні форми та контури з високою точністю, але він використовує відносно невелику кількість енергії у порівнянні з лазерним різанням, та зовсім не вимагає води як у гідроабразивному методі, що знижує витрати на утилізацію та обробку води після процесу розкрою, ще однією перевагою є те що цей тип розкрою може працювати з різними матеріалами без необхідності спеціальних налаштувань, як це часто потрібно при гідроабразивному чи лазерному розкрої.

До недоліків можна віднести як і в лазерному та гідроабразивному є вартість обладнання та кваліфікований персонал, основним недоліком є те що ультразвуковий процес може генерувати шум та вібрацію при роботі, що може бути не зручним для працівників.

Плазмовий розкрій – є високотехнологічним методом розкрою матеріалів, який працює шляхом створення плазмової дуги між електродом та соплом агрегату, у сопло подається газ, який під впливом електричної дуги перетворюється в плазму з температурою до 30 тисяч градусів, для захисту кромки матеріалу, що розрізається, від займання і обвуглення використовується захисний газ який подається через спеціальне сопло [7]. До переваг цього методу можна віднести точність та швидкість. До недоліків можна віднести вартість обладнання, висококваліфікований персонал так як правильна експлуатація впливає на якість продукції і безпеку праці, ще одним недоліком є високий нагрів матеріалів, що може бути не допустим для певних матеріалів.

Отже існує досить багато різних методів розкрою рулонних матеріалів на підприємствах легкої промисловості кожен з яких має свої переваги і недоліки, вибір конкретного способу залежить від типу матеріалів, обсягу виробництва, а також фінансових можливостей підприємства. Механічні методи, такі як ручний розкрій, шабельні ножі та вирубка, є більш доступними, але в більшості випадків поступаються автоматизованим системам за точністю та продуктивністю. Водночас високотехнологічні методи, зокрема лазерний, гідроабразивний, ультразвуковий та плазмовий розкрій, забезпечують високу якість та ефективність, проте потребують значних інвестицій і кваліфікованого персоналу. Поєднання декількох різних методів розкрою дозволяє підприємствам працювати ефективніше що в результаті дасть змогу випускати більш конкурентоспроможну продукцію завдяки економії часу та матеріалів.

Важливим фактором який впливає на ефективність розкрою рулонних матеріалів є система управління розкроєм, комп'ютеризовані системи, такі як CAD/CAM, використовують спеціальне програмне забезпечення для автоматизації процесу створення викрійок та оптимізації розташування деталей на матеріалі, враховуючи наявні данні про матеріал, параметри розкрійного комплексу – його довжину та ширину, обладнання для розкрою і витрати матеріалу, при цьому система моделює декілька різних варіантів розкладки щоб вибрати найбільш підходящий. Існує велика кількість програм, але між ними існують певні відмінності щодо функціональності, сфери застосування та особливостей використання:

– Gerber Technology – пропонує комплексні рішення для автоматизації процесу розкрою та виробництва, включаючи програмне забезпечення та обладнання, підтримує різні формати файлів та інтегрується з іншими системами виробництва [8].

– Lectra – фокусується на «розумних промислових рішеннях» для підвищення продуктивності та прибутковості клієнтів, пропонує рішення для 3D-візуалізації та автоматизованого розкрою [9].

– Optitex – пропонує рішення для створення віртуальних викрійок, 3D-симуляцій одягу та оптимізації виробничих процесів, охоплює весь цикл виробництва – від дизайну до розкрою та планування, допомагаючи скоротити час і витрати на розробку продукту [10].

– Assyst – програмне забезпечення для створення викрійок, автоматизованого розкрою та 3D-симуляцій у текстильній і модній індустрії, спеціалізується на інтеграції 2D і 3D CAD-технологій, автоматизації виробничих процесів і оптимізації використання матеріалів [11].

– NedGraphics – це провідний розробник CAD/CAM програмного забезпечення для текстильного дизайну, яке використовується у створенні одягу, предметів інтер'єру, килимів та інших текстильних виробів, має можливість візуалізувати текстильні вироби в реальному масштабі та оцінювати поведінку [12].

– SyleMan – один з провідних світових постачальників систем, що спеціалізуються на виробництві одягу та взуття [13].

– ICad3D – програмне забезпечення для дизайну взуття та розробки візерунків, яке об'єднує в одній програмі два різних середовища, 3D-дизайн і 2D-шаблони, які працюють паралельно та одночасно [14].

– Gemini CAD Systems – провідний світовий постачальник технологій для промисловості, основна діяльність якого направлена на дослідження, розробку та впровадження програмного забезпечення для швейного, автомобільного та меблевого виробництва [15].

– Morgantecnica – пропонує широкий спектр програмного забезпечення для проектування і розкладки матеріалу для ручного і автоматичного розкрою матеріалу [16].

– Reach technologies – пропонує широкий спектр програмного забезпечення для проектування і 3D візуалізації для швейної, взуттєвої, та текстильної промисловості [17].

Висновки

Планування розкрою матеріалів на підприємствах легкої промисловості відіграє одну з ключових ролей у виробництві, воно дозволяє не лише економити ресурси та планувати виробництво що забезпечить безперебійну роботу підприємства а й знизити собівартість продукції за рахунок оптимального використання сировини. Використання новітніх технологій та програмного забезпечення також дасть змогу ефективніше використовувати матеріали, а це в свою чергу зменшить кількість відходів що позитивно вплине на екологію та зменшить витрати підприємства на утилізацію.

Оптимізація процесів розкрою матеріалів підвищує конкурентоспроможність підприємства, так як дає змогу швидко виконувати замовлення та адаптувати виробництво до змін ринку, а поєднання різних методів розкрою та використання новітніх технологій дає змогу досягнути кращого балансу між якістю та ефективністю виробництва.

Подальші дослідження у цій сфері можуть бути зосереджені на вдосконаленні алгоритмів оптимізації розкрою матеріалів, використання штучного інтелекту для аналізу і планування найкращих схем розкрою, а також на автоматизації виробничих процесів.

Список використаної літератури

1. Vilumsone-Nemes I. Industrial Cutting of Textile Materials. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018. С. 6. URL: https://www.sciencedirect.com/book/9780081021224/industrial-cutting-of-textile-materials (дата звернення: 04.05.2025).

2. Vilumsone-Nemes I. Industrial Cutting of Textile Materials. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018. С. 13. URL: https://www.sciencedirect.com/book/9780081021224/industrial-cutting-of-textile-materials (дата звернення: 04.05.2025).

3. Технології експериментального та підготовчо-розкрійного виробництв швейної галузі : навч. посіб. / С. М. Березненко, О. І. Водзінська, Л. Б. Білоцька, С. Ю. Лозовенко. Київ : КНУТД, 2023. С. 144. URL: https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/24485 (дата звернення: 04.05.2025).

4. Технології експериментального та підготовчо-розкрійного виробництв швейної галузі : навч. посіб. / С. М. Березненко, О. І. Водзінська, Л. Б. Білоцька, С. Ю. Лозовенко. Київ : КНУТД, 2023. С. 161. URL: https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/24485 (дата звернення: 04.05.2025).

5. Славінська А. Аналіз сучасного настильного обладнання, що застосовується у швейній галузі / А. Славінська, О. Сиротенко // Вісник Хмельницького національного університету. 2023. № 1. С. 197. URL: https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/13613 (дата звернення: 04.05.2025).

6. Сиротенко О. Аналіз сучасного розкрійного обладнання, що застосовується у швейній галузі / О. Сиротенко, О. Дітковська // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2023. № 5, т. 2. С. 114. URL: https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/15654 (дата звернення: 04.05.2025).

7. Професійна освіта на Луганщині: теорія та практика : матеріали наук.-практ. конф., м. Луганськ, 15–17 квіт. 2014 р. Луганськ : Шико, 2014. С. 84. URL: http://hdl.handle.net/123456789/5364 (дата звернення: 04.05.2025).

8. Gerber Technology. Автоматизація процесу розкрою та виробництва: програмне забезпечення та обладнання [Електронний ресурс]. URL: https://www.gerbertechnology.com (дата звернення: 04.05.2025).

9. Lectra. Розумні промислові рішення для автоматизованого розкрою [Електронний ресурс]. URL: https://www.lectra.com (дата звернення: 04.05.2025).

10. Optitex. Віртуальні викрійки, 3D-симуляції та оптимізація виробничих процесів [Електронний ресурс]. URL: https://www.optitex.com (дата звернення: 04.05.2025).

11. Assyst. Програмне забезпечення для створення викрійок та 3D-симуляцій [Електронний ресурс]. URL: https://www.assyst.de (дата звернення: 04.05.2025).

12. NedGraphics. CAD/CAM програмне забезпечення для текстильного дизайну [Електронний ресурс]. URL: https://www.nedgraphics.com (дата звернення: 04.05.2025).

13. StyleMan. Системи для виробництва одягу та взуття [Електронний ресурс]. URL: https://www.styleman.com (дата звернення: 04.05.2025).

14. ICad3D. Програмне забезпечення для дизайну взуття та створення 3D-візерунків [Електронний ресурс]. URL: https://www.icad3d.com (дата звернення: 04.05.2025).

15. Gemini CAD Systems. Технології для автоматизації у швейному, автомобільному та меблевому виробництві [Електронний ресурс]. URL: https://www.geminicad.com (дата звернення: 04.05.2025).

16. Morgan Tecnica. Програмне забезпечення для автоматизованого розкрою матеріалів [Електронний ресурс]. URL: https://www.morgantecnica.com (дата звернення: 04.05.2025).

17. Reach Technologies. 3D-візуалізація для швейної, взуттєвої та текстильної промисловості [Електронний ресурс]. URL: https://www.reach-tech.com (дата звернення: 04.05.2025).

References

1. Vilumsone-Nemes I. (2018) Industrial Cutting of Textile Materials. Cambridge: Woodhead Publishing, pp. 6. Retrieved from: https://www.sciencedirect.com/book/9780081021224/industrial-cutting-of-textile-materials (accessed 04 May 2025).

2. Vilumsone-Nemes I. (2018) Industrial Cutting of Textile Materials. Cambridge: Woodhead Publishing, pp. 13. Retrieved from: https://www.sciencedirect.com/book/9780081021224/industrial-cutting-of-textile-materials (accessed 04 May 2025).

3. Bereznenko S. M., Vodzinska O. I., Bilotska L. B., Lozovenko S. Yu. (2023) Tekhnolohii eksperymentalnoho ta pidhotovcho-rozkriinoho vyrobnytstv shveinoi haluzi [Technologies of experimental and preparatory-cutting production in the sewing industry]. Kyiv: KNUTD, pp. 144. Retrieved from: https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/24485 (accessed 04 May 2025).

4. Bereznenko S. M., Vodzinska O. I., Bilotska L. B., Lozovenko S. Yu. (2023) Tekhnolohii eksperymentalnoho ta pidhotovcho-rozkriinoho vyrobnytstv shveinoi haluzi [Technologies of experimental and preparatory-cutting production in the sewing industry]. Kyiv: KNUTD, pp. 161. Retrieved from: https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/24485 (accessed 04 May 2025).

5. Slavinska A., Syrotenko O. (2023) Analiz suchasnoho nastylnoho obladnannia, shcho zastosovuietsia u shveinii haluzi [Analysis of modern spreading equipment used in the sewing industry]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu [Bulletin of Khmelnytskyi National University], no. 1, pp. 197. Retrieved from: https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/13613 (accessed 04 May 2025).

6. Syrotenko O., Ditkovska O. (2023) Analiz suchasnoho rozkriinoho obladnannia, shcho zastosovuietsia u shveinii haluzi [Analysis of modern cutting equipment used in the sewing industry]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky [Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences], no. 5, vol. 2, pp. 114. Retrieved from: https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/15654 (accessed 04 May 2025).

7. Profesionalna osvita na Luhanshchyni: teoriia ta praktyka [Professional education in Luhansk region: theory and practice] (2014). Proceedings of the scientific-practical conference (Ukraine, Luhansk, April 15–17, 2014). Luhansk : Shyko, pp. 84. Retrieved from: http://hdl.handle.net/123456789/5364 (accessed 04 May 2025).

8. Gerber Technology (2018) Automation solutions for cutting and manufacturing: software and equipment [Electronic resource]. Retrieved from: https://www.gerbertechnology.com (accessed 04 May 2025).

9. Lectra (2018) Smart industrial solutions for automated cutting [Electronic resource]. Retrieved from: https://www.lectra.com (accessed 04 May 2025)

10. Optitex (2018) Virtual pattern making, 3D simulation, and production optimization [Electronic resource]. Retrieved from: https://www.optitex.com (accessed 04 May 2025).

11. Assyst (2018) Software for pattern creation and 3D simulations [Electronic resource]. Retrieved from: https://www.assyst.de (accessed 04 May 2025).

12. NedGraphics (2018) CAD/CAM software for textile design [Electronic resource]. Retrieved from: https://www.nedgraphics.com (accessed 04 May 2025).

13. StyleMan (2018) Systems for garment and footwear production [Electronic resource]. Retrieved from: https://www.styleman.com (accessed 04 May 2025).

14. ICad3D (2018) Software for footwear design and 3D pattern creation [Electronic resource]. Retrieved from: https://www.icad3d.com (accessed 04 May 2025).

15. Gemini CAD Systems (2018) Technologies for automation in garment, automotive, and furniture industries [Electronic resource]. Retrieved from: https://www.geminicad.com (accessed 04 May 2025).

16. Morgan Tecnica (2018) Software solutions for automated material cutting [Electronic resource]. Retrieved from: https://www.morgantecnica.com (accessed 04 May 2025).

17. Reach Technologies (2018) 3D visualization solutions for garment, footwear, and textile industries [Electronic resource]. Retrieved from: https://www.reach-tech.com (accessed 04 May 2025).

УДК 677.11.021 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.38

С. М. КОБ'ЯКОВ
кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-2811-7572

АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЬНОЇ СИРОВИНИ

У статті подано дослідження новітньої технології виділення зі стебел насіннєвих конопель неорієнтованого лубу з певним діапазоном довжини і нормованим вмістом кострищі.

Мета дослідження полягає у розробці технології виділення зі стебел насіннєвих конопель неорієнтованого лубу з певним діапазоном довжини і нормованим вмістом кострищі. Для досягнення поставленої мети дослідили та теоретично обґрунтували основні чинники, які впливають на процес виділення лубу конопель.

У дослідженнях експериментального м'ясльно-скоблячого вузла використовували солому конопель. Обробка стебел конопель на експериментальному м'ясльно-скоблячому вузлі проводили при чотирьох режимах роботи м'ясльного вузла, незмінними факторами були: діаметр вальців, глибина заходження рифлів 10 мм та вологість матеріалу 30 %. На основі отриманих даних відзначили, що відсоток умину із зростанням частоти обертання м'ясльних вальців незалежно від фракцій стебел зменшується. Для крупностеблової соломи зі збільшенням частоти обертання м'ясльних вальців від n_1 до n_2 спостерігається істотне зниження відсотка умину з 39.6 до 37.1 %. З аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що на роботу експериментального м'ясльно-скоблячого вузла впливають властивості сировини.

Досліджування процесу очищення лубу провели із використанням двох типів трясильних пристроїв із верхнім гребеневим полем, з однаковими параметрами роботи. За винятком того, що в одному із них був встановлений вузол вібрації, за рахунок якого забезпечується відхилення верхньої гілки голчатого транспортера на 15 мм.

Використання вузла вібрації дозволяє видалити додатково від 5 до 12 % кострищі у процесі трясіння із лубу виділеного із соломи різних фізико – механічних властивостей.

Результатами дослідів встановлено, що вібраційні дії суттєво впливають на процес очищення лубу. Поєднання процесів вібрації та трясіння інтенсифікує процес очищення лубу конопель та дозволяє зменшити закостриченість отриманого лубу в 1.5 рази.

Ключові слова: *неорієнтований луб, м'ясльно-скоблячий вузел, трясильний пристрій, вузол вібрації, очищення лубу.*

S. M. KOBYAKOV
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Commodity Science, Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-2811-7572

ANALYSIS OF EXPERIMENTAL RESEARCH ON TEXTILE RAW MATERIAL PRODUCTION

The article presents a study of the latest technology for the extraction of unoriented bast from hemp seed stalks with a certain length range and a standardized content of fescue.

The purpose of the study is to develop a technology for the extraction of unoriented bast from hemp seed stalks with a certain length range and a standardized content of fescue. To achieve this goal, the main factors that influence the process of hemp bast extraction were investigated and theoretically substantiated.

In the studies of the experimental crushing and scraping unit, hemp straw was used. The processing of hemp stalks on the experimental crushing and scraping unit was carried out under four operating modes of the crushing unit, the constant factors were: the diameter of the rollers, the depth of the grooves 10 mm and the humidity of the material 30 %. Based on the data obtained, it was noted that the percentage of husk decreases with increasing frequency of rotation of the crushing rollers, regardless of stem fractions. For large-stem straw, with increasing frequency of rotation of the crushing rollers from n1 to n2, a significant decrease in the percentage of husk from 39.6 to 37.1 % is observed. From the analysis of the data obtained, it can be concluded that the operation of the experimental crushing and scraping unit is influenced by the properties of the raw material.

The study of the husk cleaning process was carried out using two types of shaking devices with an upper comb field, with the same operating parameters. Except that one of them was equipped with a vibration unit, due to which the upper branch of the needle conveyor is deflected by 15 mm.

The use of the vibration unit allows removing an additional 5 to 12 % of husk during the shaking process from the husk separated from straw of different physical and mechanical properties.

The results of the experiments showed that vibration effects significantly affect the process of cleaning the bast. The combination of vibration and shaking processes intensifies the process of cleaning hemp bast and allows reducing the amount of lumpiness of the resulting bast by 1.5 times.

Key words: *unoriented bast, crushing and scraping unit, shaking device, vibration unit, bast cleaning.*

Постановка проблеми

Традиційна технологія виділення волокна на м'яльно-тіпальних агрегатах має ряд істотних недоліків. Устаткування дороге, має велику метало-й енергоємність, у наслідок чого собівартість виробленого волокна і лубу висока.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Завдання первинної обробки луб'яних культур полягає у відокремленні технічного волокна від стебел, що супроводжується руйнуванням структури стебла. Традиційні способи отримання волокна або лубу включають такі етапи: формування шару, плющення, м'яття та тіпання.

Процес вилучення лубу з конопель (декортикація) відбувається шляхом поділу волокнистої та неволокнистої частин стебла за допомогою машин, що діють на основі механізмів плющення, зламу, тіпання, трясіння та вібрації. Найчастіше застосовуються машини, які працюють за принципом плющення-зламу, плющення-тіпання.

Різні види луб'яних рослин мають різну здатність до декортикації, що визначається природними властивостями кожної культури, а також умовами її вирощування.

Наразі в Україні відсутні сучасні технології для отримання лубу зі стебел луб'яних рослин. Враховуючи схожість фізико-механічних властивостей між соломою та трестою, а також між волокном і лубом, розглядається можливість адаптації технологій переробки трести для отримання лубу. Одна із таких технологій базується на традиційній схемі обробки соломи, яка включає процеси м'яття і тіпання з використанням класичних агрегатів для виробництва довгого (ПМГ-1 і ТДК-2) та короткого (КПП-4) волокна. У результаті за цією технологією отримують довге і коротке волокно, а також довгий і короткий луб.

Друга технологія передбачає обробку безперервної паралелізованої стрічки зі стебел соломи луб'яних культур. Завдяки цьому підходу отримують безперервну паралельну стрічку, де луб не розподіляється на довгі та короткі частини.

У сучасних умовах у деяких галузях виробництва задля здешевлення продукції та покращення її властивостей доцільним є використання лубу з конопель.

Стебла конопель характеризуються високою здатністю до декортикації та підходять для виділення лубу за допомогою відомих технологічних процесів, таких як м'яття, тіпання, трясіння та вібрація. Процеси м'яття і тіпання є характерними для традиційних процесів виділення лубу з грубостеблових культур, тому їх можна адаптувати для розробки процесу виділення лубу із конопель.

Водночас, для більш ефективного вилучення волокон або лубу необхідні новітні підходи та рішення. Традиційні технології знекострічення, попри свої позитивні властивості, мають низку недоліків і потребують удосконалення.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження спрямоване на розробку технології відокремлення неорієнтованого лубу від стебел конопель різної довжини з нормованим вмістом костриці, для подальшого використання як текстильної сировини.

Викладення основного матеріалу дослідження

У дослідженнях експериментального м'яльно-скоблячого вузла використовували солому конопель.

Вплив швидкісних режимів роботи експериментального м'ального вузла на обробку соломи конопель

Обробка стебел конопель на експериментальному м'яльно-скоблячому вузлі проводили при чотирьох режимах роботи м'ального вузла ($n_1 - n_4$) (табл. 1), незмінними факторами були: діаметр вальців, глибина заходження рифлів 10 мм та вологість матеріалу 30 %.

Таблиця 1

Частота обертання м'яльних вальців, хв$^{-1}$

Пари вальців	n_1	n_2	n_3	n_4
1–2	75	110	170	230
3–4	125	190	290	370
5–6	300	450	700	950

У досліді визначали відсоток умину за формулою:

$$У = \frac{m_{нав} - m_м}{m_{нав}} 100\ \%, \quad (1)$$

де: $m_{нав}$ – маса соломи, кг; $m_м$ – маса пром'ятої соломи, кг.

На основі отриманих даних (рис. 1) можна відзначити, що відсоток умину із зростанням частоти обертання м'яльних вальців незалежно від фракцій стебел зменшується. Це пояснюється тим, що зі збільшенням частоти обертання вальців час перебування матеріалу в зоні обробки зменшується і вільна костриця не встигає висипатись. Із рис. 1 видно, що для крупностеблової соломи зі збільшенням частоти обертання м'яльних вальців від n_1 до n_2 спостерігається істотне зниження відсотка умину з 39.6 до 37.1 % (t_p = 3.4, що більше t_m = 2.12).

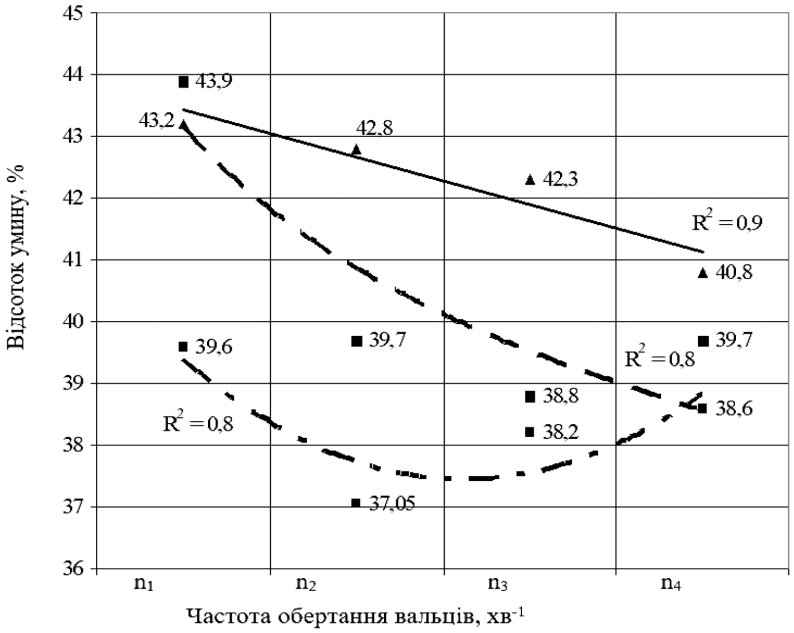


Рис. 1. Залежність відсотка умину від зміни частоти обертання м'яльно-скоблячих вальців:
крупностеолова;
середньостеблова;
дрібностеблова.

Подальше збільшення частоти обертання не має істотного впливу на відсоток умину (t_p відповідно для ($n_2 - n_3$) становить 1.1, ($n_3 - n_4$) – 0.3 і ($n_4 - n_1$) – 1.3. Для середньо – та дрібностеблової фракції соломи відбувається істотне зменшення відсотка умину в усьому діапазоні зміни частоти обертання вальців (t_p для средньостеблової соломи при порівнянні ($n_1 - n_4$) дорівнює 2.3, а дрібностеблової − 4.1).

З аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що на роботу експериментального м'яльно-скоблячого вузла впливають властивості сировини. Крупностеблову солому бажано обробляти при крайніх частотах обертання вальців ($n_1 - n_4$) (табл. 1) тоді як середньостеблову та дрібностеблову − n_1. Тому доцільно передбачити у даній частині змінний діапазон регулювання частоти обертання м'яльних пар для вибору оптимальних значень обробки.

Обробка соломи конопель на м'яльній машині ПМГ-1

Ефективність процесу м'яття соломи конопель серійною м'яльною машиною ПМГ-1 досліджували при двох варіантах частоти обертання вальців. Показником ефективності роботи був прийнятий відсоток умину.

Частоту обертання м'яльних вальців регулювали зміною шківа на валу двигуна, і вона дорівнювала: n_1 = 50 хв$^{-1}$ і n_2 = 70 хв$^{-1}$. Тиск на матеріал пружинами і вологість соломи були постійними величинами. Результати проведеного досліду представлені на рис. 2.

Отримані результати (рис. 2) свідчать про те, що дана м'яльна машина неоднаково ефективно обробляє стебла конопель із різними морфологічними властивостями. Найбільший відсоток умину спостерігався під час обробки крупностеблової соломи − 39.7 %, збільшення частоти обертання вальців приводить до його росту (t_p = 2.4). Під час обробки дрібностеблової соломи відсоток умину значно нижчий − 14.1 % (t_p = 38.8 при t_m = 2.1), із збільшенням частоти обертання вальців зменшується відсоток умину (t_p = 3.51), а на средньостеблову солому даний фактор істотно не впливає (t_p = 1.1 при t_m = 2.1). Звідси можна відзначити, що м'яльна машина ПМГ-1 менш ефективно обробляє дрібностеблову солому [1].

Із отриманих даних витікає, що при обробці соломи конопель на даній машині частоту обертання вальців необхідно вибирати із урахуванням морфологічних властивостей сировини.

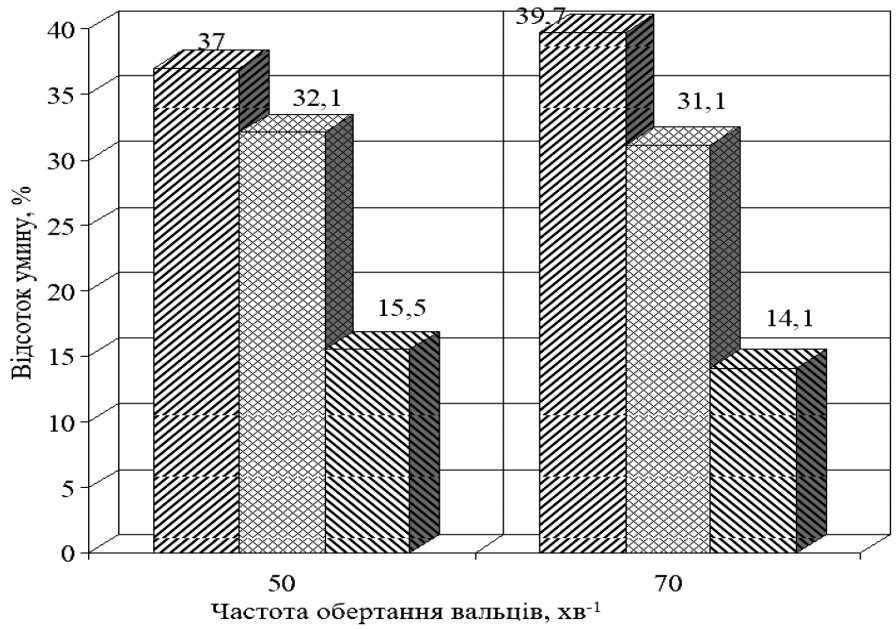


Рис. 2. Залежність відсотка умину від швидкісного режиму роботи м'яльної машини ПМГ-1:
крупностеблова;
середньостеблова;
дрібностеблова.

Порівняльний аналіз обробки соломи конопель на м'яльних машинах різного типу

У процесі експерименту були використані дві м'яльні машини: експериментальний м'ясно-скоблячий вузол та серійна м'яльна машина ПМГ-1. Кожна машина мала оптимальні частоти обертання вальців із урахуванням попередніх досліджень. Для експериментального м'ясно-скоблячого вузла частота дорівнювала 75; 125; 300 хв$^{-1}$, для ПМГ-1 − 70 хв$^{-1}$. Результати дослідження представлені на рис. 3.

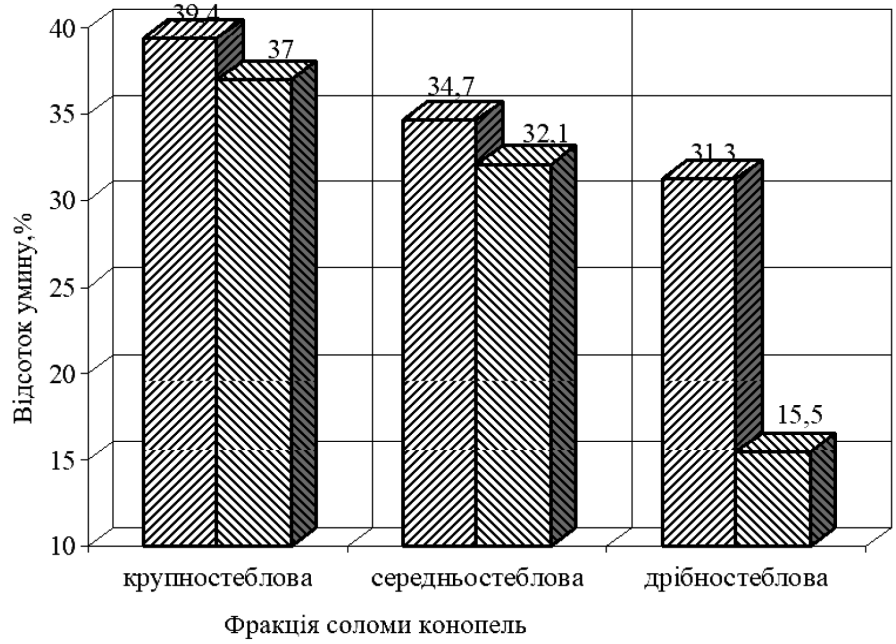


Рис. 3. Результати обробки соломи конопель на м'яльних машинах різного типу:
експериментальний м'ясно-скоблячий вузол;
м'яльна машина ПМГ-1.

Із діаграми рис. 3 бачимо, що експериментальний м'яльно-скоблячий вузол більш ефективно обробляє солому конопель різних фракцій, ніж м'яльна машина ПМГ-1. Розходження у середніх значеннях відсотка умину для всіх фракції суттєве ($t_{ркр} = 2.2$, $t_{рм} = 34.2$ при $t_m = 2.12$). Обидві м'яльні машини краще обробляють крупностеблову солому конопель. Зі зменшенням діаметру стебел знижується відсоток умину. Дана тенденція характерна для обох типів м'яльних машин. Але в експериментальному м'яльно-скоблячому вузлі для дрібностеблової сировини відсоток умину хоч і знизився, але залишається досить високим (31.3 ± 0.43 %), у той час як у ПМГ-1 він становить 15.5 ± 0.17 %.

Результати порівняльних експериментів показали, що:

– експериментальний м'яльний вузол дає вищий відсоток умину порівняно із м'яльною машиною ПМГ-1;

– обидві м'яльні машини краще обробляють крупностеблову солому конопель. Зі зменшенням діаметру стебел знижується відсоток умину. Дана тенденція характерна для обох типів м'яльних машин. Але в експериментальному м'яльно-скоблячому вузлі для дрібностеблової сировини відсоток умину хоч і знизився, але залишається досить високим (31.3 %), тоді як у ПМГ-1 він становить 15.5 %;

– при малих частотах обертання вальців для обох типів м'яльних машин обробка стебел відбувається ефективніше;

– перепад швидкостей обертання між вальцями у м'яльному вузлі із застосуванням м'яльних вальців планчатого типу підвищує ступінь руйнування зв'язку між луб'яним шаром і деревиною соломи конопель.

Порівняння ефективності обробки лубу на трясильному та трясильно-вібраційному вузлах

Досліджування процесу очищення лубу провели із використанням двох типів трясильних пристроїв із верхнім гребеневим полем, з однаковими параметрами роботи: частотою коливання голок 200 хв$^{-1}$, швидкістю руху транспортера 8 м/хв, кута розмаху голок 70°. За винятком того, що в одній із них був встановлений вузол вібрації, за рахунок якого забезпечується відхилення верхньої гілки голчатого транспортера на 15 мм, із частотою дій бійка 1500 хв$^{-1}$ [2].

Використання вузла вібрації дозволяє видалити додатково від 5 до 12 % костриці у процесі трясіння із лубу виділеного із соломи різних фізико – механічних властивостей (рис. 4). Так для лубу, виділеного із крупностеблової фракції, поєднання процесів вібрації та трясіння призводить до зниження закостриченності від 23.4 ± 1.4 % до 18.9 ± 1.2 % ($t_p = 2.4$; $t_m = 2.12$), а для лубу із дрібностеблової фракції – з 36 ± 1.4 до 25.7 ± 0.7 % ($t_p = 6.6$; $t_m = 2.12$) [3].

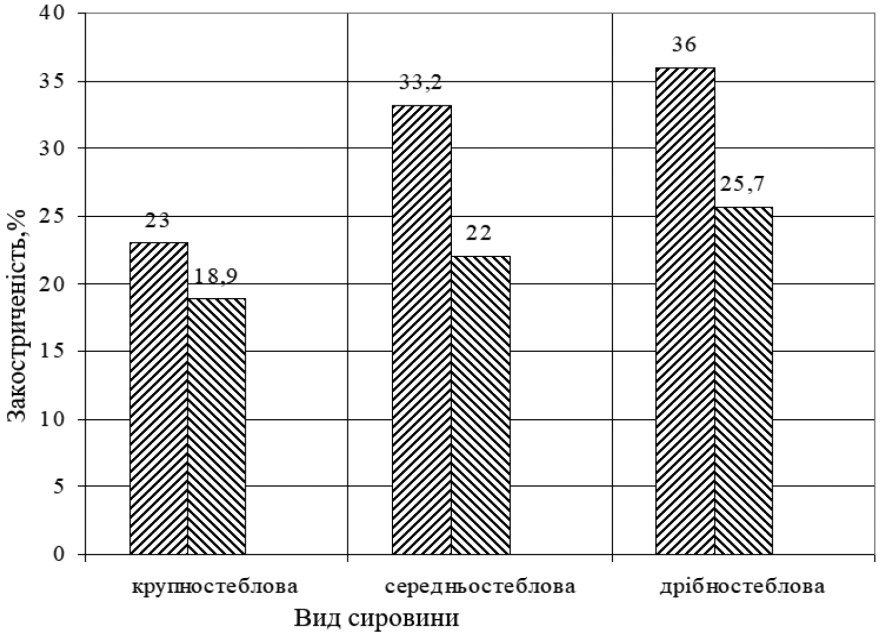


Рис. 4. Закостриченість лубу конопель у залежності від типу трясильного вузла:
трясильно-вібраційний вузол;
трясильний вузол.

Висновки

Результатами дослідів встановлено, що вібраційні дії суттєво впливають на процес очищення лубу. Параметри роботи цього вузла можуть мати наступні значення: частота ударів бійка по верхній гілці голчатого транспортера коливається у межах 1500–2250 хв$^{-1}$, висота відхилення гілки голчатого транспортера – 15 мм.

Поєднання процесів вібрації та трясіння інтенсифікує процес очищення лубу конопель та дозволяє зменшити закостриченість отриманого лубу в 1.5 рази.

Список використаної літератури

1. Коропченко С. П., Виділення лубу конопель інтенсивними механічними діями // Вісник Сумського аграрного університету. 2001. Вип. 6. С. 61–63.
2. Коропченко С. П., Гілязетдінов Р. Н., Хилевич В. С., Дослідження процесу трясіння при виділенні лубу конопель // Науковий вісник Національного аграрного університету. 2002. № 47. С. 125–127.
3. Коропченко С. П., Гілязетдінов Р. Н., Головій О. В., Вплив вібраційних та трясильних дій робочих органів на знекострічення лубу конопель // Вісник Черкаського інституту агропромислового виробництва: Міжвідомчий тематичний збірник наукових праць. Черкаси: Черкаський Інститут АПВ, 2002. Вип. 3. С. 100–103.

References

1. Koropchenko S. P., (2001). Vydilennja lubu konopelj intensyvnymy mekhanichnymy dijamy // *Visnyk Sumsjkogho aghrarnogho universytetu*, vol. 6, pp. 61–63.
2. Koropchenko S. P., Ghiljazetdinov R. N., Khylevych V. S., (2002). Doslidzhennja procesu trjasinnja pry vydilenni lubu konopelj // *Naukovyj visnyk Nacionaljnogho aghrarnogho universytetu*, no. 47, pp. 125–127.
3. Koropchenko S. P., Ghiljazetdinov R. N., Gholovij O. V., (2002). Vplyv vibracijnykh ta trjasyljnykh dij robochykh orghaniv na znekostrychennja lubu konopelj // *Visnyk Cherkasjkogho instytutu aghropromyslovogho vyrobnyctva: Mizhvidomchyj tematychnyj zbirnyk naukovykh pracj. Cherkasy: Cherkasjkyj Instytut APV*, vol. 3, pp. 100–103.

УДК 677.11.021 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.39

Ю. О. МАКСИМЧЕНКО
аспірант кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0007-4616-8836

Г. А. БОЙКО
кандидат технічних наук, доцент кафедри товарознавства,
стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8773-5525

Є. О. СЛУЧИНСЬКИЙ
аспірант кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0002-9895-1455

А. В. ЄВТУШЕНКО
аспірант кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-7103-9186

АНАЛІЗ МЕТОДІВ З ОЦІНКИ ЯКОСТІ КОНОПЛЯНОЇ ТРЕСТИ

В даній роботі було проаналізовано різні методи оцінки якості конопляної тресті: візуально-органолептичний, фізико-механічний, хімічний, біологічний, лабораторно-аналітичний та стандартизований. Визначено, що при оцінюванні якості конопляної тресті особлива увага приділяється стандартизованим підходам до визначення її характеристик, що забезпечують можливість гармонізації технологій між країнами та сприяють виходу продукції на міжнародні ринки. Здійснено порівняльний аналіз світової та вітчизняної нормативно-методичної бази з визначення якості конопляної сировини. На відміну від світової практики, в Україні нормативно-методична база в галузі технічних конопель залишається фрагментованою та потребує актуалізації. Зокрема, вітчизняні методики не враховують особливостей нових високопродуктивних сортів технічних конопель, внаслідок чого відбувається дисбаланс між оціночними критеріями тресті та фактичними властивостями волокна. Також, в роботі охарактеризовано сучасні технології вилежування конопляної тресті та зазначено, що в Україні досі переважає використання застарілих технологій вилежування стебел технічних конопель, зокрема традиційного польового вилежування. Цей метод значною мірою залежить від погодних умов – вологості, температури, тривалості опадів – що ускладнює контроль за рівномірністю та якістю біодеградації тканин стебла. Нерівномірне вилежування може призводити до формування тресті з неоднорідними властивостями, що негативно позначається на якості одержуваного волокна. Зазначено, що впровадження сучасних методів вилежування тресті конопель не лише підвищує її якість, але й дасть змогу зменшити залежність виробництва від територіальних обмежень, що виникли внаслідок війни на території України. В роботі наведені рекомендації, щодо удосконалення вітчизняних методів та впровадження сучасної оцінки якості конопляної тресті.

Ключові слова: *конопляна треста, стандарти, вилежуваність, методи оцінки якості, сорти технічних конопель, волокно.*

YU. O. MAKSYMCHENKO
Postgraduate Student at the Department of Commodity Science,
Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0007-4616-8836

H. A. BOIKO
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Commodity Science,
Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8773-5525

E. O. SLUCHYNSKY
Postgraduate Student at the Department of Commodity Science,
Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0002-9895-1455

A. V. EVTUSHENKO
Postgraduate Student at the Department of Commodity Science,
Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-7103-9186

ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING THE QUALITY OF HEMP TRUST

This work analyzed various methods for assessing the quality of hemp trust: visual-organoleptic, physical-mechanical, chemical, biological, laboratory-analytical and standardized. It was determined that when assessing the quality of hemp trust, special attention is paid to standardized approaches to determining its characteristics, which provide the possibility of harmonizing technologies between countries and contribute to the entry of products into international markets. An analysis of the global and domestic regulatory and methodological framework for determining the quality of hemp raw materials was carried out. Unlike global practice, in Ukraine the regulatory and methodological framework in the field of technical hemp remains fragmented and needs updating. In particular, domestic methods do not take into account the features of new high-yielding varieties of technical hemp, as a result of which there is an imbalance between the trust evaluation criteria and the actual properties of the fiber. Also, the paper describes modern technologies for aging hemp trusts and notes that in Ukraine, the use of outdated technologies for aging industrial hemp stems, in particular traditional field aging, still prevails. This method largely depends on weather conditions – humidity, temperature, duration of precipitation – which complicates control over the uniformity and quality of biodegradation of stem tissues. Uneven aging can lead to the formation of trusts with heterogeneous properties, which negatively affects the quality of the resulting fiber. It is noted that the introduction of modern methods for aging hemp trusts not only increases its quality, but also will reduce the dependence of production on territorial restrictions that arose as a result of the war in Ukraine. The paper provides recommendations for improving domestic methods and implementing modern assessments of hemp trust quality.

Key words: *hemp tress, standards, aging, quality assessment methods, varieties of technical hemp, fiber.*

Постановка проблеми

Останніми роками спостерігається зростання інтересу до вирощування та переробки технічної коноплі як екологічно- безпечної та багатоцільової сировини [1]. Одним із ключових продуктів первинної переробки коноплі є треста – частково розкладені стебла рослини, які проходять біологічну або хімічну обробку з метою відділення волокна від деревини. Якість трести має визначальне значення для подальшого виробництва текстильних, композитних та інших матеріалів. Відтак, точна і об'єктивна оцінка якості трести є важливим етапом у виробничому циклі. Аналіз існуючих методів оцінювання якості конопляної трести, визначення їх переваг і недоліків, а також перспектив удосконалення методик з урахуванням сучасних технологій контролю та стандартизації є актуальним завданням для коноплепереробної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Упродовж останніх років наукова спільнота приділяє значну увагу вивченню методів оцінки якості конопляної трести, зокрема в контексті впливу різних методів мочіння на фізико-хімічні та механічні властивості волокон [2–3]. Досліджуються також змочуваність лубу конопель з метою їх подальшого застосування у виробництві різних матеріалів технічного призначення [4], якість трести та сфери її подальшого використання [5]. Загалом, аналіз останніх досліджень свідчить про активний розвиток методів оцінки якості конопляної трести, зокрема в напрямку оптимізації процесів мочіння та впровадження інноваційних технологій для покращення властивостей конопляних волокон. Подальші дослідження в цій сфері сприятимуть підвищенню ефективності виробництва та якості кінцевої продукції з конопляних волокон.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є систематизація та критичний аналіз сучасних методів оцінки якості конопляної трести, визначення їх ефективності, обмежень і перспектив удосконалення, з урахуванням новітніх наукових підходів і технологічних рішень у сфері первинної переробки технічної коноплі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Якість конопляної трести є ключовим чинником, що визначає ефективність подальшої переробки сировини, зокрема виділення волокна, його технологічні властивості та кінцеве призначення продукції [6]. Для забезпечення належного рівня контролю та уніфікації показників якості застосовуються різні методи оцінки, які умовно поділяються на візуально-органолептичні, фізико-механічні, хімічні, біологічні, лабораторно-аналітичні та стандартизовані.

Візуально-органолептичні методи є найпростішими у реалізації й широко застосовуються в умовах польових та первинних заготівельних пунктах. Оцінка здійснюється за наступними зовнішніми ознаками:

1) колір трести, який може вказувати на ступінь вилежування або наявність плісняви;
2) запах, що свідчить про неповне або неправильне розкладання лігноцелюлозної маси;
3) рівномірність вилежування по довжині стебел;
4) чистота сировини, зокрема наявність залишків бур'янів, ґрунту чи інших домішок.

Попри суб'єктивність вищезазначених способів, вони є базовими для попереднього сортування партій сировини.

Фізико-механічні методи дозволяють кількісно оцінити окремі показники, що впливають на технологічну придатність трести. До таких параметрів належать міцність волокна, гнучкість або ламкість стебел, вміст волокна (визначається співвідношенням маси виділеного волокна до маси вихідної трести), а також рівень розкладання дерев'янистої частини стебла. Ці методи дають змогу прогнозувати вихід та якість волокна на стадії трести.

Хімічні методи застосовуються переважно в умовах лабораторного контролю та наукових досліджень. Вони передбачають аналіз вмісту структурних компонентів клітинної стінки – целюлози, лігніну та геміцелюлоз, що визначають міцність і придатність волокна до подальшої переробки. Також оцінюється рівень зольності, вміст залишкової вологи, що має значення для зберігання, та кислотність середовища при вилежуванні. Дані методи є більш точними, проте потребують відповідного обладнання і фахового персоналу.

Біохімічні методи знаходять застосування у разі використання мікробіологічного або ферментативного способу вилежування. Вони базуються на оцінці активності ферментів, які каталізують розкладання пектинових речовин та лігніну, а також на визначенні рівня біоактивності мікроорганізмів. Такі методи є перспективними в умовах переходу до екологічно безпечних та керованих технологій вилежування.

Лабораторно-аналітичні методи – передбачають використання сучасного високоточного обладнання та дають змогу досліджувати структурно-хімічний стан трести. Зокрема, застосовується інфрачервона спектроскопія (FTIR) для визначення ступеню деградації лігніну, термогравіметричний аналіз (TGA) для вивчення термостабільності компонентів, мікроскопічний аналіз для оцінки морфології клітинної стінки. Ці методи є дороговартісними, проте забезпечують об'єктивну та детальну оцінку якості сировини.

Стандартизовані методи формують нормативно-правову основу для оцінки трести у промисловому виробництві. На сучасному етапі у світі існує низка нормативних документів, які регламентують методи оцінювання якості натуральних технічних волокон, зокрема й луб'яних, до яких належить конопляне волокно [7]. Особливу увагу приділяють стандартизованим підходам до визначення характеристик трести, що забезпечують можливість гармонізації технологій між країнами та сприяють виходу продукції на міжнародні ринки.

Серед світових стандартів, які частково або повністю охоплюють методи отримання та оцінки трести [8], доцільно виділити наступні:

– ISO 20706-1:2019 Textiles – Qualitative and quantitative analysis of some bast fibres (flax, hemp, ramie) and their blends – Part 1: Fibre identification using microscopy methods – цей стандарт встановлює методи ідентифікації луб'яних волокон (льон, коноплі, рамія) за допомогою світлової мікроскопії (LM) та скануючої електронної мікроскопії (SEM). Він також застосовується до сумішей цих волокон та виробів з них. Забезпечує точну ідентифікацію волокон у текстильній продукції, що важливо для контролю якості та запобігання фальсифікаціям;

– ISO 5773:2023 Textiles – Determination of components in flax fibres – цей стандарт описує методи кількісного аналізу вмісту целюлози, геміцелюлози, лігніну, пектину, жирів та восків у волокнах льону. Хоча він безпосередньо стосується льону, його методики можуть бути використані як довідкові для аналізу інших луб'яних волокон, таких як коноплі. Дозволяє оцінити хімічний склад волокон, що є важливим для визначення їх якості та придатності для різних текстильних застосувань;

– ASTM WK87041 New Test Methods for Measuring Length and Width of Industrial Hemp Fibers – американський стандарт розробляється для встановлення методів вимірювання довжини та ширини промислових конопляних волокон, включаючи підготовку зразків, проведення вимірювань та критерії звітності. Це важливо для забезпечення якості та відповідності продукції вимогам ринку;

– ASTM WK75916 New Test Methods for Hemp Fiber Initiative – проєкт американського стандарту спрямований на розробку методів оцінки фізичних та хімічних властивостей целюлозних волокон рослини Cannabis sativa L., включаючи швидкі та точні методи для оцінки якості волокон.

На відміну від світової практики, в Україні нормативно-методична база в галузі технічних конопель залишається фрагментованою та потребує актуалізації. Значна частина методик походить із радянського періоду, зокрема:

– ГОСТ 6729-60 «Треста конопляна. Технічні умови» та ГОСТ 27345-87 «Треста конопляна. Технічні умови» – стандарти, що регламентують методики відділення волокна від трести шляхом мокрого чи хімічного розмочування з подальшим механічним відділенням;

– ГОСТ 10379-76 «Пенька тіпана. Технічні умови» та ГОСТ 9993-74 «Пенька коротка. Технічні умови» – включають вимоги до якості волокон, отриманих із трести, а також критерії їх придатності до подальшої текстильної або технічної переробки;

– ДСТУ 4820:2007 «Коноплі. Терміни та визначення понять» – сучасніший стандарт, частково адаптований під національні умови, який визначає основні терміни, що стосуються конопель, їх класифікації, ботанічних характеристик, продукції переробки, а також вмісту психоактивних речовин (зокрема, ТГК – тетрагідроканабінолу).

У таблиці 1 представлено порівняння світових та вітчизняних стандартів, що регламентують методи отримання та оцінки якості трести.

Світові стандарти, представлені ISO та ASTM, орієнтовані на уніфіковані методи дослідження волокон рослинного походження, незалежно від конкретної культури та засновані на сучасних методах оцінювання луб'яної сировини. Вітчизняна ж нормативна база була створена в умовах застарілих технологій і не враховує сучасні підходи – ферментативне розмочування, біоактивні системи вилежування чи новітні сорти конопель, що унеможливлює її використання в сучасних умовах розвитку коноплепереробної галузі.

Таким чином, можна констатувати необхідність модернізації вітчизняної нормативної бази у напрямку гармонізації з міжнародними стандартами (ISO, ASTM, EN), з одночасним збереженням специфіки, властивої українському сортименту та умовам вирощування конопель. Це дозволить не лише забезпечити конкурентоспроможність продукції на внутрішньому й зовнішньому ринках, а й сприятиме розвитку стандартизованої та прозорої системи контролю якості в секторі технічних конопляних культур.

Застаріла нормативна база оцінювання якості трести не відповідає сучасним технологічним вимогам до кінцевого продукту – технічного волокна. Зокрема, чинні методики не враховують особливостей нових високопродуктивних сортів технічних конопель, таких як ЮСО-31, Глухівські 51, Зоряна, Вікторія, Глесія, Ніка, Золотонінські 15, Гляна [9], характеристики яких представлені у таблиці 2.

Ці сорти характеризуються модифікованим хімічним складом (зокрема співвідношенням целюлози, лігніну та пектинових речовин) і відмінною морфологічною структурою стебел, що безпосередньо впливає на процес формування трести та якість одержуваного волокна. Внаслідок чого відбувається дисбаланс між оціночними критеріями трести та фактичними властивостями волокна, що ускладнює не лише внутрішній технологічний контроль, але й перешкоджає адаптації продукції до вимог міжнародних ринків, де діють інші, більш актуальні стандарти оцінки.

Крім того, в Україні досі переважає використання застарілих технологій вилежування стебел технічних конопель, зокрема традиційного польового вилежування [10]. Цей метод значною мірою залежить від погодних умов – вологості, температури, тривалості опадів – що ускладнює контроль за рівномірністю та якістю біодеградації тканин стебла. Нерівномірне вилежування може призводити до формування трести з неоднорідними властивостями, що негативно позначається на якості одержуваного волокна.

Суттєвою проблемою є неможливість використання значної частини територій України для посіву конопель та природного вилежування стебел у зв'язку з воєнними діями, тимчасовою окупацією, масовим мінуванням сільськогосподарських угідь, руйнуванням інфраструктури та загальною деградацією агроландшафтів. Особливо критичним є становище у південних (Херсонська, Запорізька, частково Миколаївська), східних (Донецька, Луганська, Харківська) та частково центральних регіонах (Дніпропетровська, північ Київської області), які до початку повномасштабного вторгнення активно використовувалися для вирощування конопель. У цих умовах традиційне польове вилежування, ефективне за мирного часу, стає практично непридатним, що суттєво звужує технологічні можливості галузі.

Застосування таких методів також суперечить сучасним принципам сталого розвитку, які передбачають екологічну безпечність технологічних процесів, раціональне використання ресурсів, мінімізацію втрат сировини та адаптацію до кліматичних і соціально-економічних змін. У цьому контексті особливої актуальності набуває впровадження інноваційних, контрольованих методів вилежування, які не залежать від зовнішніх природних чи політичних факторів та відповідають сучасним технологічним і екологічним вимогам.

Серед таких методів варто відзначити:

1. Бактеріальне (водне) вилежування – забезпечує швидке та рівномірне розщеплення пектинових речовин за участю природних або внесених мікроорганізмів у контрольованому середовищі (резервуарах з водою). Цей процес скорочує терміни вилежування до 5–7 діб, але вимагає точного контролю температури та pH (оптимум: 5,5–6,5).

2. Ферментативне вилежування – передбачає застосування комерційних ферментних препаратів (пектиназ, целюлаз, ксиланаз), які каталізують розпад лігніну та пектинових зв'язків. Метод відзначається високою ефективністю, екологічною безпечністю та мінімальними втратами волокна, проте потребує значних інвестицій в обладнання.

3. Механізовано-контрольоване вилежування в тюках – застосовується для оптимізації простору та логістики. Стебла попередньо плющаться, формуються у тюки, в яких створюються умови для природного ферментативного процесу з мінімальним впливом погодних чинників.

Таблиця 1

Світові та вітчизняні стандарти, що регламентують методи отримання та оцінки якості трести

№ п/п	Назва стандарту	Країна/ організація	Сфера застосування	Актуальність
1	ISO 20706-1:2019 Textiles – Qualitative and quantitative analysis of some bast fibres (flax, hemp, ramie) and their blends – Part 1: Fibre identification using microscopy methods	Міжнародний (ISO)	1. Аналіз волокнистої сировини переробки; 2. Оцінка якості сировини для текстильної та паперової промисловостей, а також для композиційних матеріалів, біоізоляційних матеріалів; 3. Контроль якості на всіх етапах виробництва (від збору сировини (трести) до готового волокна; 4. Уніфікація оцінки в лабораторних умовах	Дозволяє порівнювати тресту різного походження та способів обробки
2	ISO 5773:2023 Textiles – Determination of components in flax fibres	Міжнародний (ISO)	1. контроль якості льоноволокна; 2. наукові дослідження; 3. міжнародна торгівля	Висока актуальність для аналізу хімічного складу волокон технічних конопель
3	ASTM WK87041 New Test Methods for Measuring Length and Width of Industrial Hemp Fibers	США (ASTM)	Розробка стандартизованих методів вимірювання довжини та ширини технічних конопель. Перебуває на стадії розробки	Для України, яка має значний потенціал у вирощуванні та переробці технічних конопель, впровадження стандартів, подібних до даного стандарту, є важливим кроком до інтеграції у світовий ринок текстильної продукції
4	ASTM WK75916 New Test Methods for Hemp Fiber Initiative	США (ASTM)	Цей проєкт спрямований на створення стандартизованих методів для: – визначення фізичних властивостей конопляного волокна; – аналізу хімічного складу; – оцінки морфологічних характеристик волокон	Актуальність полягає у стандартизації якості продукції, підвищенні конкурентоспроможності та сприянню науковим дослідженням та інноваціям
5	ГОСТ 6729-60 «Треста конопляна. Технічні умови» та ГОСТ 27345-87 «Треста конопляна. Технічні умови»	СРСР/ Україна	Цей стандарт поширюється на тресту з технічних конопель, виготовлену шляхом польового вилежування. Другий стандарт є більш оновленим. Охоплює: вимоги до трести, виготовленої різними методами (в т.ч. водним і мікробіологічним)	Низька актуальність стандарту обумовлена його застарілістю, адже в ньому не враховуються сучасні технології оброки (наприклад, ферментативне або мікробіологічне вимочування) та не відповідає вимогам європейського ринку. Актуальність другого методу помірна, якщо використовується в межах СНД або базового контролю якості. Не «гармонізований» з ISO чи ASTM
6	ГОСТ 10379-76 «Пенька тіпана. Технічні умови» та ГОСТ 9993-74 «Пенька коротка. Технічні умови»	СРСР/Україна	Регламентують технічні умови для пеньки	Актуальність ГОСТ 10379-76 обмежена, адже стандарт орієнтований на радянську технологію обробки та не враховує сучасні вимоги до текстильної промисловості. Актуальність ГОСТ 9993-74 низька через застарілість стандарту. Орієнтований на сировину нижчої якості, що не відповідає вимогам споживача та не адаптований до міжнародної сертифікації
7	ДСТУ 4820:2007 «Коноплі. Терміни та визначення понять»	Україна	Чинний національний стандарт. Стандарт охоплює терміни та визначення понять, що стосуються: – біологічної характеристики конопель; – технології вирощування; – селекції та насінництва; – хвороб і шкідників; – збирання та первинної обробки; – оцінки якості продукції	Цей стандарт забезпечує єдину термінологічну базу для фахівців, науковців, виробників та регуляторних органів у сфері коноплярства. Це сприяє уніфікації термінів, що важливо для ефективної комунікації та розвитку галузі. Потребує доповнення з урахуванням міжнародних вимог, експортного потенціалу та інноваційних методів вилежування

Впровадження зазначених методів не лише підвищує якість трести, але й дає змогу зменшити залежність виробництва від територіальних обмежень, що виникли внаслідок війни, а також підвищити експортний потенціал українського коноплярства шляхом відповідності продукції міжнародним стандартам (ISO, EN, ASTM). На рис. 1 Наведено порівняння методів вилежування стебел технічних конопель.

Аналізуючи рис. 1 можна дійти висновку, що традиційне польове вилежування значно поступається сучасним методам як за ефективністю, так і за екологічними характеристиками. Незважаючи на відносну простоту й низьку собівартість, його висока залежність від кліматичних умов і тривалий термін вилежування (у середньому до

Таблиця 2

Сучасні сорти технічних конопель з рекомендованими зонами вирощування

№ п/п	Назва сорту	Основне призначення	Вміст ТГК (%)	Характеристики	Рекомендовані зони вирощування
1	ЮСО-31	Волокно/насіння	<0,08	Стійкий до хвороб, стабільний урожай насіння і волокна	Полісся, Лісостеп
2	Глухівські 51	Волокно	<0,08	Високий вихід трести, добре підходить для первинної переробки	Полісся
3	Зоряна	Волокно/біомаса	<0,08	Підвищена біомаса, швидке достигання	Центральний Лісостеп
4	Вікторія	Насіння/волокно	<0,08	Універсальний сорт, придатний до механізованого збирання	Полісся, північний Степ
5	Глесія	Волокно	<0,08	Добре формується треста, якісне волокно	Лісостеп
6	Ніка	Волокно	<0,08	Стійкий до вилягання, однорідне дозрівання	Лісостеп, Поділля
7	Золотонінські 15	Волокно/ біоенергетика	<0,08	Потужна зелена маса, підходить для технічної та енергетичної переробки	Центральний та південний Лісостеп
8	Гляна	універсальний	<0,08	Комбіноване призначення, адаптивний до різних кліматичних зон	Полісся, Лісостеп, частково північний Степ

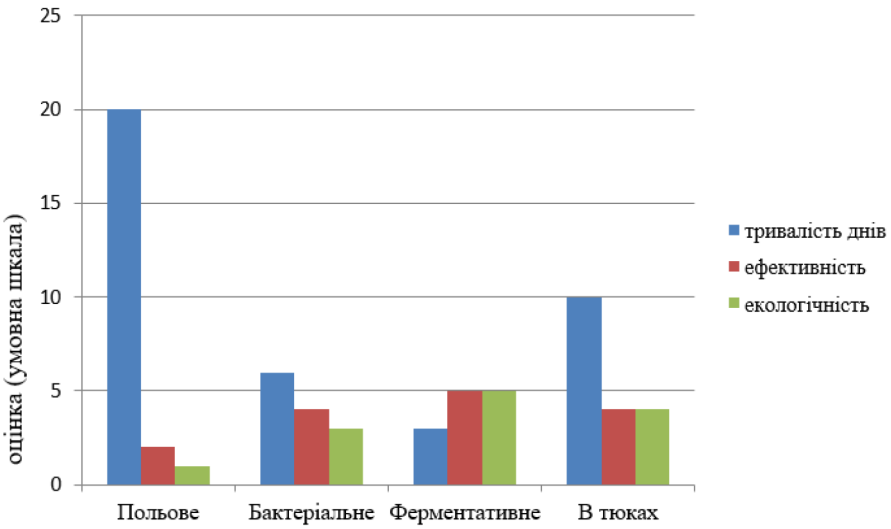


Рис. 1. Порівняння методів вилежування стебел технічних конопель

20 днів) знижують загальну стабільність технологічного процесу. Натомість ферментативне вилежування демонструє найвищі показники за двома ключовими параметрами: ефективністю та екологічністю, а також має найкоротший термін реалізації (2–5 днів). Це робить його особливо перспективним у контексті впровадження сталих технологій. Бактеріальне вилежування також має високу ефективність та скорочену тривалість, однак потребує постійного контролю середовища (температури, pH, мікрофлори). Метод вилежування в тюках посідає проміжне положення, поєднуючи відносно короткий час і прийнятні екологічні показники, що робить його придатним для регіонів із обмеженим доступом до води або централізованого обладнання.

Висновки

Таким чином, сучасні технології вилежування мають стратегічне значення для адаптації виробництва до нових економічних, екологічних і геополітичних викликів. Їх упровадження є важливою умовою підвищення конкурентоспроможності українського конопляного волокна на внутрішньому та міжнародному ринках.

Для забезпечення якості конопляного волокна та адаптації виробництва до умов воєнного часу необхідна модернізація системи оцінки трести та технологій її формування, з урахуванням нових сортів, інноваційних методів вилежування та екологічно сталих підходів. Це дозволить забезпечити відповідність міжнародним стандартам та зменшити залежність від зовнішніх ризиків.

Список використаної літератури

1. Головенко Т. М., Бойко Г. А., Шовкомуд О. В. Розвиток вітчизняної текстильної галузі за рахунок конкурентоспроможної сировини. Міжнародна науково-практичної конференція «Інноваційні технології одержання виробів різного функціонального призначення, їх стандартизація та сертифікація». 2016, С. 13–18.

2. Мигаль М. Д., Лайко І. М., Міщенко С. В. Взаємозв'язок між кількісними і якісними ознаками волокна конопель. *Луб'яні та технічні культури*. 2015, Вип. 4(9), С. 14–39.

3. Міщенко С. В., Писаренка П. В., Чайки Т. О., Агроекологічні та селекційні основи культивування конопель в умовах раціонального природокористування. Раціональне використання ресурсів в умовах екологічно стабільних територій: колективна монографія. Полтава, 2018, С. 73–80.

4. Горач О. О., Гуреєва С. С., Шот В. Е. Дослідження змочуваності лубу льону олійного та конопель. *Товарознавчий вісник*. 2019, Вип. 12, С. 89–96.

5. Cappelletto P., Mongardini F., Sannibale M., Brizzi M. Mechanical treatment of field retted oil seed flax and hemp. Resulting fibers can restorer cycled fibers quality. Nordflax: proceeding and abstractsof the first Nording Conferenceon flax and hemp processing (10–12 August 1998), heldin Tampere, Finland, P. 127–141.

6. Тіхосов А. С., Нежлукченко Н. В., Ляліна Н. П. Споживні характеристики конопляних волокон, одержаних з трести різних способів приготування. *Товарознавчий вісник*. 2020, Вип. 13, С. 65–72.

7. Соловей С. М., Ковальчук О. О. Основні напрями розвитку технологій збирання та переробки конопель. *Наукові нотатки*. 2023, № 76, С. 89–93.

8. Девіс К., Реннер Т. Промислове використання волокна конопель у Європі та зміни у нормативно-правовому полі. *Journal of Natural Fibers*. 2024, № 51, С. 147–152.

9. Головій О. В., Лайко І. М., Йотка О. Ю. Каталог сортів промислових конопель і льону-довгунця. Глухів : Інститут луб'яних культур ІСГПС НААН, Нотабене, 2016. 14 с.

10. Шольц Л., Беккер М. Коноплі: від поля до волокна – огляд. *Fibers*. 2024, Т. 12, № 2. С. 37–48.

References

1. Golovenko T. M., Boyko G. A., Shovkomud O. V. (2016) Rozvytok vitchyznianoi tekstylnoi haluzi za rakhunok konkurentospromozhnoi syrovyny. [Development of the domestic textile industry at the expense of competitive raw materials]. Proceedings of the *International scientific and practical conference "Innovative technologies for obtaining products of various functional purposes, their standardization and certification"*. pp. 13–18.

2. Mygal M. D., Laiko I. M., Mishchenko S. V. (2015) [The relationship between quantitative and qualitative characteristics of hemp fiber]. *Bast and technical crops*. vol. 4 (9), pp. 14–39.

3. Mishchenko S. V., Pisarenka P. V., Chayki T. O. (2018) *Ahroekolohichni ta selektsiini osnovy kultyvuvannia konopel v umovakh ratsionalnoho pryrodokorystuvannia. Ratsionalne vykorystannia resursiv v umovakh ekolohichno stabilnykh terytorii* [Agroecological and breeding foundations of hemp cultivation in conditions of rational nature management. Rational use of resources in conditions of ecologically stable territories]. Poltava, pp. 73–80.

4. Gorach O. O., Gureeva S. S., Shot V. E. (2019). [Research on the wettability of oilseed flax and hemp]. *Tovaroznavny visnyk*. vol. 12, pp. 89–96.

5. Cappelletto R., Mongardini F., Sannibale M., Brizzi M. (1998) [Mechanical treatment of field retted oil seed flax and hemp] Proceedings of the *Resulting fibers can restorer cycled fibers quality. Nordflax: proceeding and abstractsof the first Nording Conferenceon flax and hemp processing (10–12 August)*, Tampere, Finland, pp. 127–141.

6. Tikhosov A. S., Nezhlukchenko N. V., Lyalina N. P. (2020). [Consumer characteristics of hemp fibers obtained from different processing methods]. *Tovaroznavny Visnyk*. Issue 13, pp. 65–72.

7. Solovey S. M., Kovalchuk O. O. (2023) [Main directions of development of technologies of harvesting and processing of hemp]. *Scientific notes*. vol. 76, pp. 89–93.

8. Davis K., Renner T. (2024). [Industrial use of hemp fiber in Europe and changes in the regulatory field]. *Journal of Natural Fibers*. vol. 51, pp. 147–152.

9. Goloviy O. V., Laiko I. M., Yotka O. Yu. (2016). [Catalog of varieties of industrial hemp and long flax. Glukhiv]. *Institute of bast crops ISGPS NAAS*, Notabene, 14 p.

10. Scholz L., Becker M. (2024). [Hemp: from field to fiber – a review]. *Fibers*. vol. 12, №. 2. Pp. 37–48.

УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

УДК [005.8:378]:330.131.7 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.40

І. Б. АЗАРОВА
доктор технічних наук,
доцент кафедри Національної безпеки та управління суспільним розвитком
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
ORCID: 0000-0002-9332-5124

Т. М. БЕЗВЕРХНЮК
доктор наук з державного управління, професор,
завідувач кафедри Національної безпеки та управління суспільним розвитком
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
ORCID: 0000-0002-2567-8729

О. В. ЯЦЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри Національної безпеки та управління суспільним розвитком
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
ORCID: 0009-0009-5545-3350

СОЦІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИТРАТ І ВИГІД ЯК ІНСТРУМЕНТ СТРАТЕГІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ОСВІТНІХ ІНІЦІАТИВ В УКРАЇНІ

У статті висвітлено потенціал використання методу соціального аналізу витрат і вигід (Social Cost-Benefit Analysis, SCBA) як аналітичного інструменту для оцінки ефективності освітніх ініціатив, що реалізуються закладами вищої освіти в Україні. Визначено, що сучасна система оцінювання освітніх програм здебільшого орієнтована на нормативну відповідність, що не дозволяє комплексно оцінити соціальні вигоди освітньої діяльності для ключових стейкхолдерів – здобувачів освіти, роботодавців, місцевих громад. У статті обґрунтовано доцільність запровадження SCBA як підходу, що забезпечує можливість порівняння альтернативних освітніх проєктів та стратегій на основі їх довгострокового соціального впливу. Метою дослідження є узагальнення міжнародного досвіду застосування SCBA в освітній сфері та окреслення можливих напрямів імплементації цього підходу в практику діяльності українських закладів вищої освіти. У ході дослідження розглянуто приклади успішного використання SCBA в оцінці довгострокових результатів освітніх інтервенцій у Швеції, країнах Африки, а також у сфері регуляторної оцінки в Україні. Узагальнено напрями, в яких SCBA може бути застосовано для аналізу ефективності освітніх програм, порівняння стратегій розвитку вишів, оцінки соціального впливу університетів на місцеві спільноти. Зроблено висновок, що застосування SCBA дозволяє сформувати об'єктивну, доказову базу для ухвалення управлінських рішень у сфері освіти, сприяє раціоналізації витрат, підвищенню результативності інвестицій у людський капітал та формуванню прозорих механізмів комунікації між університетами і зовнішніми стейкхолдерами. Перспективним напрямом подальших наукових досліджень є адаптація методики SCBA до специфіки освітнього менеджменту в Україні та розробка інструментів її практичного застосування на рівні освітніх програм і проєктів.

Ключові слова: *соціальний аналіз витрат і вигід, оцінка ефективності, освітні програми, соціальний вплив, проєктний аналіз, освітня політика.*

I. B. AZAROVA
Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of National Security
and Social Development Management
State University of Intellectual Technologies and Communication
ORCID: 0000-0002-9332-5124

T. M. BEZVERKHNIUK
Doctor of Science in Public Administration, Professor,
Head of the Department of National Security
and Social Development Management
State University of Intellectual Technologies and Communication
ORCID: 0000-0002-2567-8729

O. V. YATSENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of National Security
and Social Development Management
State University of Intellectual Technologies and Communications
ORCID: 0009-0009-5545-3350

SOCIAL COST-BENEFIT ANALYSIS AS A STRATEGIC ASSESSMENT TOOL FOR EDUCATIONAL INITIATIVES IN UKRAINE

The article highlights the potential of using the Social Cost-Benefit Analysis (SCBA) method as an analytical tool for assessing the effectiveness of educational initiatives implemented by higher education institutions in Ukraine. It is established that the current system for evaluating educational programs is mainly focused on regulatory compliance, which does not allow for a comprehensive assessment of the social benefits of educational activities for key stakeholders – students, employers, and local communities. The paper substantiates the feasibility of introducing SCBA as an approach that enables comparison of alternative educational projects and strategies based on their long-term social impact. The purpose of the study is to generalize international experience in applying SCBA in the education sector and to outline potential areas for the implementation of this approach in the practice of Ukrainian higher education institutions. The study examines examples of successful SCBA application in assessing long-term results of educational interventions in Sweden, African countries, and within the scope of regulatory impact analysis in Ukraine. The paper summarizes the areas where SCBA can be applied to analyze the effectiveness of educational programs, compare university development strategies, and assess the social impact of universities on local communities. The study concludes that SCBA provides an objective, evidence-based foundation for decision-making in the education sector, supports the rationalization of expenditures, increases the efficiency of investment in human capital, and facilitates transparent communication mechanisms between universities and external stakeholders. A promising direction for further research is the adaptation of the SCBA methodology to the specifics of educational management in Ukraine and the development of tools for its practical application at the level of educational programs and projects.

Key words: *social cost-benefit analysis, efficiency assessment, educational programs, social impact, project analysis, education policy.*

Постановка проблеми

Під час впровадження актуальних соціально-економічних трансформацій як на локальному місцевому рівні, так і на загальному рівні за галузями господарювання або регіонами, прийняття управлінських рішень щодо реалізації проєктів та програм потребує комплексної оцінки їх впливу не лише на фінансові показники, а й на добробут суспільства в цілому. Саме тому метод соціального аналізу витрат і вигід (далі – SCBA, від англ. – Social Cost-Benefit Analysis), що виник на початку XX століття як інструмент оцінки ефективності інфраструктурних проєктів у сфері державного управління [1], набуває дедалі більшого значення.

Особлива цінність SCBA полягає у можливості врахувати як прямі, так і непрямі соціальні ефекти, включаючи зовнішні ефекти, вплив на зайнятість, якість життя, екологію та інші аспекти сталого розвитку. Проте, однією з ключових проблем застосування цього методу у вітчизняній освітній сфері є те, що потенціал означеного методу оцінки використано не повністю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз останніх досліджень та публікацій, присвячених теоретичним та практичним засадам проведення SCBA, свідчить про зростаючу увагу до цієї методології у прийнятті рішень щодо державних інвестицій та політик. Загалом, сучасні дослідження підкреслюють значущість SCBA як інструменту для прийняття обґрунтованих рішень, особливо в контексті інвестицій в публічній та приватній сферах [2]. Зокрема, закордонними вченими було розглянуто використання SCBA при проведенні проєктного аналізу як одного з можливих методів оцінки змін у добробуті суспільства внаслідок реалізації певних проєктів або політик [3]. Не зважаючи на те, що протягом останніх десятиліть було докладено багато зусиль для подальшого розширення та розвитку відповідних інструментів проєктної оцінки, вчені підкреслили, що методи кількісного визначення та оцінки конкретних ефектів у рамках аналізу витрат і вигід все ще потребують подальшого розвитку. Застосування SCBA є достатньо поширеним в оцінці екологічних проєктів. Фахівці Організації економічного співробітництва та розвитку підкреслюють важливість врахування екологічних аспектів у процесі аналізу, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо природоохоронних заходів [4].

В Україні методологічні засади проведення SCBA також є предметом активних дискусій [5, 6]. Дослідження вітчизняних науковців наголошують на важливості врахування специфіки національних та галузевих особливостей при проведенні аналізу, оскільки це впливає на оцінку майбутніх вигод і витрат. Цікавий досвід застосування SCBA в нашій країні було отримано під час оцінки впливу впровадження нових технологій. Наприклад, аналіз передумов та прогнозованих ефектів від впровадження електронного голосування в Україні показав, що успіх залежить від ретельного врахування як прямих, так і непрямих факторів [7].

Що стосується напрямів застосування SCBA в освітній галузі, то актуальним прикладом використання окремих елементів SCBA можуть слугувати методологічні засади проведення аналізу регуляторного впливу законодавчих актів, що регулюються постановою Кабінету Міністрів України від 11.03.2004 № 308 [8].

Базові засади та напрями використання SCBA для оцінки інших освітніх ініціатив, що реалізуються, приміром, освітніми закладами на місцях, у вітчизняних публікаціях майже не були висвітлені. Що дає підставу вважати, що ця методологія не є поширеною в освітніх проєктах України.

Проте автори дослідження вважають, що означений аналітичний інструмент має значно більш широкий потенціал свого використання. Згідно до гіпотези дослідження, SCBA може стати перспективною основою формування навчальними закладами дієвої системи показників оцінки результативності освітніх програм, стратегій розвитку навчальних закладів та навіть окремих проєктних ініціатив на місцях.

Формулювання мети дослідження

Цю публікацію присвячено визначенню та обґрунтуванню на базі досвіду закордонних дослідників напрямів використання SCBA в проєктному аналізі освітніх проєктів, що реалізуються закладами вищої освіти на місцевому рівні.

Викладення основного матеріалу дослідження

Одне з досліджень зазначає, що аналіз витрат і вигід (англ. Cost-Benefit Analysis, CBA) це систематичний і формалізований набір процедур для оцінки фінансування та реалізації політики чи програми [1]. Для підприємств приватного сектору цей аналіз логічно зводиться до підрахунку інвестицій, яких потребує проєкт, та порівняння інвестиційних витрат із прибутком підприємства, очікуваним в результаті реалізації відповідного проєкту. Проте, в публічному секторі, в якому здійснюється регулювання та адміністрування освітньої галузі, вигоди проєктів вимірювати виключно за показником прибутку не є коректним [9]. Для проєктів, що спрямовані на задоволення більш широкого кола потреб суспільства, включаючи освітні потреби, існує окрема методика оцінки соціальних вигід, яка отримала назву соціального аналізу витрат та вигід. Саме цей вид аналізу рекомендується провідними дослідниками для застосування в усіх сферах державного інвестування як найбільш популярний інструмент для порівняння кількох альтернативних проєктів чи програм та прийняття рішення щодо фінансування найбільш перспективних з позицій отримання від реалізації таких проєктів найбільших вигід для суспільства [10].

З огляду на встановлену сутність та призначення SCBA, очевидними напрямками використання цього виду аналізу в освітній галузі є стратегічне планування розвитку галузі, оцінка ефективності інвестицій в сфері освіти та обґрунтування освітніх реформ. Саме для вирішення останньої задачі окремі елементи SCBA на сьогодні активно використовуються при проведенні аналізу регуляторного впливу законодавчих актів Міністерства освіти і науки України [11].

Проте, спробуємо далі дослідити практичну користь, яку можливо отримати від впровадження SCBA в систему оцінки освітніх проєктів, що реалізуються на рівні закладів вищої освіти.

Оцінка ефективності впровадження освітніх програм. Поточний підхід до оцінки освітніх програм полягає переважно у встановленні ступеню відповідності між стандартами освіти, ліцензійними вимогами впровадження освітньої діяльності і іншими регулюючими галузь вимогами та фактичним освітнім середовищем у межах освітньої програми [12]. Означений підхід не дозволяє порівнювати та обирати поміж кількох освітніх програм кращу з позиції максимізації вигоди освітньої програми для роботодавців, здобувачів освіти та інших стейкхолдерів освітніх програм. В той час, як SCBA має для такої оцінки весь необхідний методологічний апарат. Оцінити ефективність освітньої програми за цією методологією можливо, на приклад, на базі визначення наступних показників, що характеризуватимуть отримувані вигоди для стейкхолдерів:

- відповідність освітньої програми вимогам ринку праці за критеріями актуальності для роботодавців отримуваних у межах освітніх програм навичок та компетенцій за певним фахом;
- рівень працевлаштування випускників на роботу за фахом, в тому числі – в Україні;
- відповідність рівню оплати труда випускників освітньої програми зарплатній медіані за певною посадою на ринку праці;
- тривалість періоду стажування випускника на посаді відносно середніх значень такої тривалості та ін.

За сформованими на базі SCBA критеріями оцінки ефективності, наприклад, в галузі інформаційних технологій можливо встановити, що додаткові витрати на регулярне оновлення навчальних планів можуть окупитися за 3–5 років завдяки зростанню доходів випускників і зниженню рівню безробіття серед молоді.

Оцінка довгострокових вигід від освітніх інтервенцій. Дослідження авторів свідчать, що освітяни європейських країн мають позитивний досвід використання SCBA для оцінки тривалих впливів окремих освітніх ініціатив на суспільство. Зокрема, виконаний на базі методології SCBA аналіз результатів виконання програми соціального та емоційного навчання у Швеції, виявив істотне зниження вживання наркотиків серед учасників за підсумками реалізації програми. Таким чином було доведено, що вигоди від цієї програми перевищили її витрати [13].

У вітчизняних реаліях актуальною задачею впровадження SCBA за згаданим напрямом може стати, приміром, оцінка доцільності включення курсу з фінансової та інвестиційної грамотності як вибіркової компоненти освітньої програми підготовки здобувачів технічних спеціальностей. Актуальність подібної ініціативи може бути доведена

за індикаторами зменшення боргового навантаження на молодь у майбутньому, підвищення рівнів економічної самостійності, підприємництва та покращення навичок залучення інвестицій на реалізацію власних стартапів.

Порівняння альтернативних освітніх стратегій та політик. Наведені вище практичні приклади застосування SCBA свідчать, що цей вид аналізу дозволяє обрати найбільш перспективний стратегічний напрям розвитку вишу. Зокрема, на базі порівняння витрат з прогнозованими вигодами (доходами, розвитком людського капіталу тощо), можливо здійснити вибір між стратегією впровадження дуальної освіти, чи, наприклад, програми стажування студентів за кордоном.

Оцінка соціального впливу університетів. В умовах поточної загальнодержавної політики скорочення кількості вишів та прийняття не завжди достатньо вмотивованих управлінських рішень про об'єднання несумісних за напрямами і засобами навчання закладів, SCBA може стати незамінною основою для об'єктивізації цього процесу. На базі цього виду аналізу закладами освіти можливе проведення самооцінки щодо:

- внеску закладу освіти у місцеву економіку;
- сприяння у створенні інноваційного середовища;
- розвитку підприємництва серед студентів;
- впливу на регіональний ринок праці, тощо.

За результатами такої самооцінки можуть бути сформовані пропозиції щодо реформування або укрупнення окремих навчальних закладів.

Придатність SCBA для проведення оцінки соціальних впливів освітніх закладів підтверджується у публікаціях африканських науковців, які на базі означеної методології аналізу дослідили соціальні та додаткові переваги в якості мотиваційних факторів для інвестування у формальну освіту [14].

Висновки

За результатами виконаного дослідження, SCBA має величезний потенціал використання українськими вишами в якості сучасного аналітичного інструменту для обґрунтування, порівняння та оцінки освітніх проєктних ініціатив. Досвід закордонних дослідників та практиків освітньої сфери свідчить, що цей інструмент здатен створити об'єктивну доказову основу для ухвалення зважених рішень як на рівні вишів, так і на рівні управління освітньою галуззю, з урахуванням оптимізації ресурсних витрат та досягнення широкого спектру соціальних вигод у тривалій перспективі.

Окремої уваги заслуговує потенціал SCBA як інструменту стратегічної комунікації між закладами вищої освіти та зовнішніми стейкхолдерами – роботодавцями, органами влади, донорами та громадськістю. Запровадження прозорої системи обґрунтування суспільної цінності освітніх програм здатне не лише підвищити довіру до освітніх ініціатив, але й сприяти залученню зовнішнього фінансування на розвиток університетських проєктів. У цьому контексті SCBA може розглядатися як один із елементів формування соціального капіталу університету та його репутації як рушія регіонального розвитку.

Засади імплементації SCBA в систему прийняття управлінських рішень на різних рівнях керування системою освіти потребують подальших наукових опрацювань. Що робить цей напрямок одним із ключових для подальших досліджень.

Список використаної літератури

1. Flynn, S. I. Cost Benefit Analysis: Decision Making in the Public Sector. 2021. URL: https://www.ebsco.com/research-starters/business-and-management/cost-benefit-analysis-decision-making-public-sector (дата звернення: 07.04.2025).

2. Azudin, A., Endut, Wan A., Noor, N., Jusop, M. & Long, Y. Cost-Benefit Analysis in The Local Authorities and Effective Decision-Making in Public Investment. *Journal of Entrepreneurship and Business*. 2024. Vol. 12, pp. 32–42.

3. Ruffino, P., Jarre, M. Chapter Seven – Appraisal of cycling and pedestrian projects. *Advances in Transport Policy and Planning*. 2021. Vol. 7, P. 165–203.

4. Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use / OECD, Paris, 2018. 456 p.

5. Бєсєдіна О. Аналіз ефективності державних рішень. Метод витрат та вигід. 2016. URL: https://www.rada.gov.ua/uploads/documents/38964.pdf (дата звернення: 07.04.2025).

6. Кібук Т. Класифікація основних видів аналізу вигід та витрат. *Економіка та суспільство*. 2021. Вип. 26. URL: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/351 (дата звернення: 07.04.2025).

7. Sadykova, Y. M. & Starynskyi, Mykola & Horobetc, N & Zhornokui, Y. A cost-benefit analysis of preconditions and predicted effects from e-voting implementation in Ukraine. *Trames. Journal of the Humanities and Social Sciences*. 2018. Vol. 22, no. 72, P. 257–271.

8. Про затвердження методик проведення аналізу впливу та відстеження результативності регуляторного акта: постанова Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2015 р. № 266 / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/308-2004-%D0%BF#Text (дата звернення: 08.04.2025).

9. Heerkens, G. The social cost-benefit analysis. *PM Network*, 2012. Vol. 26, no. 4, P. 24–25. URL: https://www.pmi.org/learning/library/business-projects-cost-benefit-analysis-4290 (дата звернення: 07.04.2025).

10. Gramlich, E. The methodology of benefit-cost analysis. *Vital Speeches of the Day*. 2002. Vol. 69, P. 68–77. URL: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=8554177&site=ehost-live (дата звернення: 07.04.2025).

11. Лісовий О. Аналіз регуляторного впливу проєкту наказу Міністерства освіти і науки України «Про внесення змін до Порядку визнання у вищій та фаховій передвищій освіті результатів навчання, здобутих шляхом неформальної та/або інформальної освіти». 2025. URL: https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/regulatorna_dijalnist/2025/oprylyudn-proyektiv-rehulyat-aktiv-2025/01/07/arv-proyekt-nakazu-pro-vnes-zmin-do-poryadku-vyzn-u-vyshchiy-ta-fp-osviti-rez-navchannya-07-01-2025.doc (дата звернення: 07.04.2025).

12. Рекомендації щодо застосування критерії оцінювання якості освітньої програми / Алькема В. Г. та ін.; за ред. Бутенко А. П. Київ : Оріон, 2020. 66 с.

13. Klapp, A., Belfield, C. R., Bowden, B., Levin, H. M., Shand, R. & Zander, S. A Benefit-Cost Analysis of a Long-Term Intervention on Social and Emotional Learning in Compulsory School. *The international Journal of Emotional Education*. 2017. Vol. 9, no. 1, P. 3–19.

14. Ampofo, S.Y., Bizimana, B., Ndayambaje, I., Karongo V., Lawrence, J. K. L., & Orodho, J. A. Social and Spill-Over Benefits as Motivating Factors to Investment in Formal Education in Africa: A Reflection around Ghanaian, Kenyan And Rwandan Contexts. *Journal of Education and Practice*. 2015. Vol. 6, no. 11, P. 134–147.

References

1. Flynn, S. I. (2021) *Cost Benefit Analysis: Decision Making in the Public Sector*. Available at: https://www.ebsco.com/research-starters/business-and-management/cost-benefit-analysis-decision-making-public-sector (accessed: 07.04.2025).

2. Azudin, A., Endut, Wan A., Noor, N., Jusop, M. & Long, Y. (2024) Cost-Benefit Analysis in The Local Authorities and Effective Decision-Making in Public Investment. *Journal of Entrepreneurship and Business*. Vol. 12, pp. 32–42.

3. Ruffino, P., Jarre, M. (2021) Chapter Seven – Appraisal of cycling and pedestrian projects. *Advances in Transport Policy and Planning*. Vol. 7, pp. 165–203.

4. OECD (2018) *Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use*. OECD Publishing, Paris, 456 p.

5. Bjesjedina O. (2016) *Analiz efektyvnosti derzhavnykh rishenj. Metod vytrat ta vyghid* [Analysis of the effectiveness of government decisions Cost-benefit method]. Available at: https://www.rada.gov.ua/uploads/documents/38964.pdf (in Ukrainian)

6. Kibuk T. (2021) Klasyfikatsiya osnovnykh vydiv analizu vyhid ta vytrat [Classification of the main types of benefit-cost analysis]. *Economy and society*. Vol. 26. URL: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/351 (in Ukrainian)

7. Sadykova, Y. M. & Starynskyi, Mykola & Horobetc, N & Zhornokui, Y. (2018) A cost-benefit analysis of preconditions and predicted effects from e-voting implementation in Ukraine. *Trames. Journal of the Humanities and Social Sciences*. Vol. 22, no. 72, pp. 257–271.

8. Pro zatverdzhennya metodyk provedennya analizu vplyvu ta vidstezhennya rezul′tatyvnosti rehulyatornoho akta [On approval of the methods of conducting impact analysis and monitoring the effectiveness of a regulatory act]: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 29, 2015 No. 266 / *Verkhovna Rada of Ukraine*. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/308-2004-%D0%BF#Text (in Ukrainian).

9. Heerkens, G. (2012) The social cost-benefit analysis. *PM Network*, Vol. 26(4), pp. 24–25. Available at: https://www.pmi.org/learning/library/business-projects-cost-benefit-analysis-4290 (accessed: 07.04.2025).

10. Gramlich, E. (2002) The methodology of benefit-cost analysis. *Vital Speeches of the Day*. Vol. 69, pp. 68–77. URL: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=8554177&site=ehost-live (accessed: 07.04.2025).

11. Lisovyy O. (2025) *Analiz rehulyatornoho vplyvu proyektu nakazu Ministerstva osvity i nauky Ukrayiny "Pro vnesennya zmin do Poryadku vyznannya u vyshchiy ta fakhoviy peredvyshchiy osviti rezul'tativ navchannya, zdobutykh shlyakhom neformal'noyi ta/ abo informal'noyi osvity"* [Analysis of the regulatory impact of the draft order of the Ministry of Education and Science of Ukraine "On Amendments to the Procedure for Recognition of Learning Outcomes Acquired through Non-Formal and/or Informal Education in Higher and Professional Pre-Higher Education"]. URL: https://mon.gov.ua/static-objects/mon/sites/1/regulatorna_dijalnist/2025/oprylyudn-proyektiv-rehulyat-aktiv-2025/01/07/arv-proyekt-nakazu-pro-vnes-zmin-do-poryadku-vyzn-u-vyshchiy-ta-fp-osviti-rez-navchannya-07-01-2025.doc (in Ukrainian).

12. Butenko A.P. (ed.) (2020) *Rekomendatsiyi shchodo zastosuvannya kryteriyi otsinyuvannya yakosti osvitn'oyi prohramy* [Recommendations for the application of criteria for assessing the quality of an educational program] Kyiv : Orion, 66 p. (in Ukrainian).

13 Klapp, A., Belfield, C. R., Bowden, B., Levin, H. M., Shand, R. & Zander, S. (2017) A Benefit-Cost Analysis of a Long-Term Intervention on Social and Emotional Learning in Compulsory School. *The international Joutnal of Emotional Education*. Vol. 9, no. 1, pp. 3–19.

14. Ampofo, S.Y., Bizimana, B., Ndayambaje, I., Karongo V., Lawrence, J. K. L., & Orodho, J. A. (2015) Social and Spill-Over Benefits as Motivating Factors to Investment in Formal Education in Africa: A Reflection around Ghanaian, Kenyan and Rwandan Contexts. *Journal of Education and Practice*. Vol. 6, no. 11, pp. 134–147.

УДК 330.131.7; 330.43; 334 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.41

А. І. ПЛЯСКІНА
кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри менеджменту, маркетингу і туризму
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-3680-162X

ДОСЛІДЖЕННЯ БІЗНЕС-СЕРЕДОВИЩА КОМПАНІЙ НА ОСНОВІ ІННОВАЦІЙ (ЗЕЛЕНА ЛОГІСТИКА)

Стаття присвячена дослідженню компаній, які адаптують свій бізнес до викликів сучасності, де «зелена» логістика розглядається як одна із дієвих технологій забезпечення розвитку бізнесу. Так, більшість іноземних компаній при здійсненні своєї діяльності використовують саме «зелені» технології. Встановлено, що «зелена» логістика, як технологія інновації, згуртовує в єдине більшість типів інновацій.

Завдяки розгляду більшості практик «зеленої» логістики в компаніях автором зроблено висновки: компанії дедалі частіше використовують інноваційні методи; компанії використовують способи «декарбонізації» економіки. Розроблено стратегію розвитку компаній через призму цілей «зеленої» логістики. Економічна ефективність впровадження «зеленої» логістики бізнес-середовище компаній можна розглянути на базі стратегічних пріоритетів: державна підтримка та економічні стимули, зменшення витрат завдяки оптимізації процесів, підвищення конкурентоспроможності на міжнародному ринку, зменшення екологічних ризиків і штрафів, економія на утилізації відходів.

Оскільки на ефективність «зеленої» логістики впливає досить багато факторів внутрішнього та зовнішнього середовища, то вони можуть завдати як збитків, так і стати джерелом додаткових прибутків. Виникають ризики при застосуванні «зеленої» логістики: несуміжність нових технологій до наявних процесів, висока вартість впровадження екологічних технологій, недостатній розвиток державної екологічної інфраструктури, незапланові витрати на підготовку співробітників, в деяких сегментах відсутній попит на екологічні послуги, можливість перебоїв у електропостачанні чи зв'язку, терористичні акти. Зазначені теоретико-методичні напрацювання дослідження є підґрунтям для подальших наукових розвідок у сфері логістики, стратегії розвитку та інноваційних технологій.

Ключові слова: *компанія, «зелена» логістика, бізнес-середовище, інноваційні методи, технологія, стратегія розвитку, стратегічні пріоритети, ризик, фактори зовнішнього середовища.*

A. I. PLYASKINA
PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Management, Marketing and Tourism
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-3680-162X

RESEARCH OF THE BUSINESS ENVIRONMENT OF COMPANIES BASED ON INNOVATIONS (GREEN LOGISTICS)

The article is devoted to the study of companies that are adapting their business to the challenges of today, where "green" logistics is considered as one of the effective technologies for ensuring business development. Thus, most foreign companies use green technologies in their operations. It is established that green logistics, as a technology of innovation, unites most types of innovations into a single one.

After reviewing the majority of green logistics practices in companies, the author draws conclusions: companies are increasingly using innovative methods; companies are using ways to «decarbonize» the economy. A strategy for the development of companies through the prism of green logistics goals has been developed. The cost-effectiveness of implementing green logistics in the business environment of companies can be considered based on strategic priorities: government support and economic incentives, cost reduction through process optimization, increased competitiveness in the international market, reduction of environmental risks and fines, and savings on waste disposal.

Since the effectiveness of green logistics is influenced by many internal and external environmental factors, they can cause both losses and become a source of additional income. Risks arise when applying green logistics: incompatibility of new technologies with existing processes, high cost of implementing environmental technologies, insufficient development of the state environmental infrastructure, unplanned costs for employee training, lack of demand for environmental services in some segments, the possibility of power or communication outages, and terrorist attacks. These theoretical and methodological developments of the study are the basis for further research in the field of logistics, development strategies and innovative technologies.

Key words: *company, green logistics, business environment, innovative methods, technology, development strategy, strategic priorities, risk, environmental factors.*

Постановка проблеми

Консеквентна зміна станів або явищ, яка відбувається закономірним порядком, призводить до підвищення конкурентоспроможності та необхідних результатів виробництва. Тому для більшості сучасних компаній постає питання: завдяки яким технологіям можливо оптимізувати взаємовідносини суб'єктів економіки і факторів зовнішнього середовища, які впливають на них?

Звісно, що в межах даного дослідження неможливо здійснити детальний аналіз всіх інноваційних технологій. Тому, розглянемо тільки ті, які є доступними та дієвими в управління бізнес-середовища компаній.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ґрунтовний огляд наукових праць даного напряму продемонстрував, що існує значна кількість досліджень, які направлені на опис та вивчення особливостей різних інноваційних технологій.

В широких колах дослідників відомо, що термін «інновація» вперше використав австрійський та американський економіст Йозеф Шумпетер на початку XX століття. Під ними він розумів перетворення (зміни) з метою реалізації й використання нової функції виробництва, її нової комбінації, продукції.

В XXI столітті існує багато підходів до розуміння інновацій (за змістом, сферою застосуванням). Наприклад, є типи інновацій: технологічні (створення нових технологій виробництва, інформаційних систем, джерел енергії), продуктові (створення нових товарів), економічні (інновації в оцінюванні результатів роботи), соціальні (нові форми активізації суспільства) тощо. На нашу думку, саме «зелена» логістика, як технологія інновації, згуртовує в єдине більшість типів інновацій.

Формулювання мети дослідження

Для українського бізнес-середовища, яке прагне підсилити конкурентоспроможність на міжнародних ринках, впровадження постулатів «зеленої» логістики не лише відповідає сучасним екологічним вимогам, але, з іншого боку, є однією з технологій оптимізації витрат, підвищення ділової репутації та залучення інвестицій. Проте, незважаючи на значний потенціал такої технології, її поширення в Україні залишається незначною через низку бар'єрів, серед яких відсутність чітких стратегічних підходів та низький рівень авторитетності. Таким чином, тема дослідження є актуальною та має значення для розробки практичних рекомендацій, спрямованих на створення комфортних умов співпраці суб'єктів господарювання в глобальній економіці.

Викладання основного матеріалу дослідження

На нашу думку, технологія – це систематизація певного необхідного набору сукупних знань, відомостей, прийомів та інструментів для досягнення потрібного результату.

Більшість іноземних компаній при здійсненні своєї діяльності використовують саме «зелені» технології. Такий підхід до управління технологічними процесами, ресурсними та енергетичними потоками надає можливість зменшувати збитки навколишньому середовищу, забезпечувати соціальний розвиток працівників та використовувати ефективне інноваційне виробництво.

Так, було проведено опитування «The Green Trends Survey» [1], серед комерційних компаній та їх клієнтів на провідних світових ринках Азії (Індія, Китай), Європи (Великобританія, Німеччина) та Америки (США, Бразилія). Результати опитування показали, що місце «зеленої» логістики розцінюється як один з першорядних факторів розвитку та активності суб'єктів господарювання, збереження навколишнього середовища. Переважна більшість респондентів зауважили, що використання «зелених» технологій для компаній – це не маркетинговий хід, а життєво важлива необхідність, яка дає можливість знизити витрати і впливати на репутацію компанії та її корпоративну відповідальність.

Зокрема, фундаментальність «зеленої» логістики активно пропагує Європейська логістична асоціація, яка щорічно складає європейський рейтинг логістичних проектів European Award for Logistics Excellence. Глобальний проєкт «Зелений транспорт» (The Global Green Freight Project) [2], ініційований міжнародною коаліцією «Чистий клімат і повітря» (Climate and Clean Air Coalition), привертає увагу до проблем розвитку екологічно чистого транспорту, сприяє забезпеченню максимально коректної оцінки та обліку шкідливих викидів, розповсюдженню технологій і широкого спектра заходів зі зниження викидів. Основні завдання проєкту – обмін інформацією, розробка стандартів, оцінка технологій і фінансових стимулів для різних країн і регіонів при просуванні товарів у ланцюгах поставок. У 2008 році за підтримки уряду Нідерландів було запущено державну програму Lean&Green, цілями якої є підвищення стійкості логістичних послуг унаслідок зменшення викидів шкідливих речовин в атмосферу, скорочення споживання енергії та зниження шуму від роботи транспорту.

Ще один Європейський проєкт SWIFT LI Green (Sweden-Italy Freight Transport and Logistics Green Corridor), реалізований у 2013–2016 роках, був спрямований на розроблення принципів, інструментів і рекомендацій з екологізації логістики в міжнародних транспортних коридорах Швеції та Італії [3]. Розроблення «зелених» технологій є одним із напрямів діяльності глобального проєкту TEN-T (Trans-European Transport Networks) [4], основними завданнями якого є інтеграція всіх транспортних коридорів на території Євросоюзу, забезпечення змішаних перевезень, розвиток транспортної інфраструктури, оптимізація обслуговування та підвищення ефективності взаємодії учасників процесу доставки. Метою проєкту Cargo [5] є підвищення ефективності та екологічності використання

видів транспорту на основі залучення інформаційно-телекомунікаційних технологій. Зниження викидів CO_2 досягається в результаті оптимізації управління вантажними перевезеннями, узгодження руху транспортних засобів і виконання логістичних операцій у системі доставки вантажу із застосуванням методів динамічного планування та аналізу оперативної інформації про стан вантажів, рухомого складу та об'єктів транспортної інфраструктури.

Як зазначає виконавчий директор Глобального договору Організації Об'єднаних Націй (ООН) Ліз Кінго [6]: «Багато компаній починають дивитися на світ через призму цілей сталого розвитку. Підприємці прагнуть оцінити, як їхній бізнес, товари та послуги співвідносяться з реаліями планети і як вони задовольнятимуть попит сьогодні та в довгостроковій перспективі». Дослідження показують, що компанії, які обирають шлях розвитку на основі корпоративній соціальній відповідальності та інноваційності проходять етапи.

Завдяки розгляду більшості практик «зеленої» логістики в компаніях можна зробити висновок, що:

– компанії дедалі частіше використовують інноваційні методи;

– компанії використовують способи «декарбонізації» економіки (застосування екологічно чистих джерел енергії задля зменшення впливу антропогенного впливу на навколишнє середовище).

На думку Є. Мішеніна, важливим елементом впровадження моделі «зеленої» економіки в Україні є екологізація національного промислового комплексу. Це вимагає інноваційного переосмислення традиційних організаційно-управлінських підходів, зокрема шляхом впровадження логістичних принципів. Досягнення соціально-економічних цілей промислових підприємств пов'язане з оптимізацією потокових процесів на основі еколого-економічних принципів, а також із розробкою інтегрованого механізму екологічно орієнтованого логістичного управління виробництвом [27].

Компанії, які прагнуть адаптувати свій бізнес до викликів сучасності починають розглядати «зелену» логістику як одну із дієвих технологій забезпечення розвитку бізнесу, її конкурентоспроможності, а не як тренд специфікації ззовні. Інвестиції в екологічні технології створюють додану вартість для компанії, скорочують її вплив на довкілля та відкривають новочасні перспективи на глобальному ринку.

Стратегію розвитку компаній можна окреслити через призму цілей «зеленої» логістики (таблиця 1).

Таблиця 1

Етапи напряму розвитку компаній через призму цілей «зеленої» логістики

Етапи	Спрямування	Заходи
Розроблення (обміркову-вання факторів впливу, можливостей)	Комплектування дій подальшого розвитку	Нові організаційні методи в діловій практиці, організації робочих місць, зовнішніх зв'язків. Заходи сполучні зі своїми діловими інтересами
Локалізація (адаптація до умов, особливостей, вимог)	Здійснення стратегічних планів розвитку, іннова-ційного потенціалу	Реалізація та аналіз причин досягнення чи недосягнення результатів
Нормалізація (формуван-ня відповідностей)	Використання стратегії співробітництва	Пошук компромісів між очікуванням та потребами

Джерело: сформовано автором

Для українського бізнес-середовища більшість сьогоденних підходів до управління «зеленою» логістикою компаній базуються на інтеграції екологічних цілей. Здійснення стратегічних планів розвитку можливо у вигляді:

– автоматизації логістичних процесів;

– використанні енергоефективних транспортних засобів;

– інтеграції принципів циркулярної економіки (повторне використання матеріалів, рециклінг відходів, мінімізація упаковки);

– впровадженні концепції TFM (Total Flow Management).

Економічна ефективність впровадження «зеленої» логістики бізнес-середовище компаній можна розглянути на базі стратегічних пріоритетів:

– Державна підтримка та економічні стимули.

А) Зменшення податкового навантаження. Пільги для компаній у рамках законодавства дозволяють знизити витрати на ведення бізнесу та можуть забезпечувати певні процеси, які важливі для економіки та суспільства. Наприклад, в Україні найбільш поширеними законними методами уникнення податків є застосуванням використання можливості списання безнадійних боргів, вкладення коштів у благодійну діяльність тощо.

Б) Гранти, субсидії. Уряди та міжнародні організації пропонують фінансування для компаній, що впроваджують екологічні технології, а також підтримка компаній на різних етапах їх розвитку. Наприклад, ТОВ «Еко-Переробка» з міста Кропивницький отримало грант у розмірі 5 мільйонів гривень на проект з переробки пластикових відходів.

– Зменшення витрат завдяки оптимізації процесів.

А) Раціоналізація маршрутів. Використання найраціональнішого комплексу заходів, цифрових рішень, для оптимізації логістичних маршрутів. Це дозволяє мінімізувати холості пробіги транспортних засобів, сприяє

економії коштів на обслуговування та паливо, допомагає оптимізувати витрати на доставку необхідних ресурсів, продукції.

Б) Енергозбереження, зниження витрат на паливо. Використання енергоефективного транспорту (електромобілі та гібридні авто, інтелектуальні транспортні системи).

– Підвищення конкурентоспроможності на міжнародному ринку.

А) Залучення нових сегментів клієнтів. Чимало міжнародних компаній обирають постачальників, які впроваджують саме «зелену» логістику (співпраця з екологічно свідомими партнерами). Наприклад, основними напрямами співробітництва з міжнародними організаціями є: охорона біологічного різноманіття, транскордонних водотоків і міжнародних озер, озонового шару, атмосферного повітря; зміна клімату; поводження з відходами; оцінка впливу на довкілля.

Б) Привабливість для екологічно свідомих клієнтів. «Зелені» ініціативи підвищують імідж компанії на зовнішніх ринках, де екологічні стандарти є важливими для бізнес-партнерів. Наприклад, «EcoHome» – українська компанія, яка спеціалізується на виробництві екологічно чистих будівельних матеріалів, використовуючи біорозкладні матеріали. Завдяки цьому, продукція «EcoHome» не тільки зменшує негативний вплив на довкілля, але й забезпечує високий рівень комфорту та енергоефективності будинків.

– Зменшення екологічних ризиків і штрафів.

А) Відповідність міжнародним екологічним стандартам (одиниць). Впровадження «зеленої» логістики забезпечує відповідність вимогам міжнародного законодавства, що мінімізує ризики штрафів і санкцій. Так, метою розробки міжнародних стандартів навколишнього середовища є оцінювання й поліпшення екологічних характеристик діяльності промисловості підприємств та створенні умов для надання населенню екологічної інформації.

Б) Попередження кризових ситуацій. Кризові ситуації передбачають наявність значних структурних змін довкілля. Так, скорочення викидів CO_2 і дотримання екологічних норм зменшують ризики репутаційних втрат і можливих обмежень для роботи на міжнародних ринках.

– Економія на утилізації відходів (залучення до замкнених циклів виробництва). Це дозволяє інтегруватися в модель циркулярної економіки, яка передбачає відновлення, повторне використання ресурсів, створюючи додаткову цінність.

Не слід забувати, що на ефективність «зеленої» логістики впливає досить багато факторів внутрішнього та зовнішнього середовища, які можуть як завдати збитків, так і стати джерелом додаткових прибутків. Тому ризики, які можуть виникнути із застосуванням «зеленої» логістики і безпосередньо впливати на бізнес-середовище кампаній наступні:

1. Несуміжність нових технологій до наявних процесів. Оскільки впровадження сучасних «зелених» рішень вимагає адаптації виробничих та логістичних систем, то це може створювати ризик затримок або тимчасового зниження ефективності.
2. Висока вартість впровадження екологічних технологій. Наприклад, закупівля електротранспорту, обладнання для рекуперації енергії або встановлення систем для сортування відходів чи оновлення інфраструктури потребує чималих капіталовкладень. А це може негативно вплинути на економічно-фінансові результати компанії в короткостроковій перспективі.
3. Недостатній розвиток державної екологічної інфраструктури. Наприклад, брак зарядних станцій для електромобілів або труднощі з утилізацією відходів можуть обмежити ефективність впроваджених стратегічних рішень.
4. Незаплановані витрати на набуття нових знань, навичок персоналу. Мається на увазі, що впровадження екологічних ініціатив потребує підготовки співробітників, а це додаткові кошти на тренінги та підвищення кваліфікації.
5. В окремих споживацьких сегментах може бути відсутність попиту на екологічні послуги. За додаткову вартість «зелених» послуг не всі клієнти згодні доплачувати, що знижує рентабельність таких ініціатив.
6. Можливість перебоїв у електропостачанні чи зв'язку. Відсутність доступу до електроенергії та інтернету робота виробничих і логічних систем ускладняються, що спричинює значні простої.
7. Терористичні акти. Можливі руйнування інфраструктури компанії і значні затримки у роботі через зупину виробництва.

Для мінімізації даних ризиків компанії зобов'язано ретельно планувати (проектувати) впровадження екологічних ініціатив з урахуванням власних технічних та фінансових можливостей. Проводити попередню оцінку ризиків може допомогти використання методів стратегічного аналізу, що дозволяють визначити перелік подальших стратегічних дій – SWOT- аналіз і PEST-аналіз. Співпрацювати з міжнародними партнерами та експертами в галузі «зеленої» логістики для використання оптимальних практик. Також важливо забезпечити інформаційно-комунікаційну діяльність компанії для підвищення обізнаності клієнтів та персоналу про переваги «зеленої» логістики (використання стратегії співробітництва).

Висновки

Проведене дослідження підтверджує про появу нової філософії ведення бізнесу, яка базується на корпоративній соціальній відповідальності та екологізації діяльності, формуванню позитивного іміджу компанії. Можна з впевненістю стверджувати, що екологізація логістичних процесів сприяє не лише захисту довкілля (що є першочерговим завданням для глобального світу), але й підвищенню ефективності бізнес-процесів, економічної вигоди та соціальної значущості.

Список використаної літератури

1. Delivering tomorrow. Towards sustainable logistics how business innovation and green demand drive a carbon-efficient industry URL: http://www.dhi-usa.com/con-tent/dam/downloads
2. Global green freight URL: http://www.globalgreenfreight.org
3. SWIFTLY green URL: https://www.bbt-se.com/en/information/news/detail/news/swiftly-green-completed/
4. CL. YMA project URL: https://clarity-project.info/info/about/
5. 1-Cargo URL: https:/i-cargo.cu/
6. Business leaders endorse sustainable development goals as framework for shaping corporate strategies. URL: https:/www.unglobalcompact.org/news/3571-06-25-2016
7. Мішенін Є., Коблянська І. Логістичне управління промисловим виробництвом у контексті розвитку «зеленої» економіки в Україні. *Економіст*. 2012. № 1. С. 8-12.URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/econ_2012_1_3

References

1. Delivering tomorrow (2023). Towards sustainable logistics how business innovation and green demand drive a carbon-efficient industry URL: http://www.dhi-usa.com/con-tent/dam/downloads [in English].
2. Global green freight (2022). URL: http://www.globalgreenfreight.org [in English].
3. SWIFTLY green (2023). URL: https://www.bbt-se.com/en/information/news/detail/news/swiftly-green-completed/ [in English].
4. CL. YMA project (2023). URL: https://clarity-project.info/info/about/ [in English].
5. 1-Cargo (2024). URL: https:/i-cargo.cu/ [in English].
6. Business leaders endorse sustainable development goals as framework for shaping corporate strategies. (2016). URL: https:/www.unglobalcompact.org/news/3571-06-25-2016 [in English].
7. Mishenin Ye. V., Koblianska I. I. (2012). Lohistychne upravlinnia promyslovym vyrobnytstvom u konteksti rozvytku “zelenoi” ekonomiky v Ukraini. *Ekonomist*. 2012. № 1. S. 8–12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/econ_2012_1_3 [in Ukrainian].

УДК 339.13 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.42

Д. В. РЕВЕНЕЦЬ
аспірант кафедри «Менеджмент та адміністрування»
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0009-0005-0917-3252

СЕГМЕНТАЦІЯ РЕГІОНАЛЬНОГО РИНКУ ІТ-ПОСЛУГ: МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ ТА ІНСТРУМЕНТИ ВПЛИВУ

У статті розглядається проблема нерівномірного розвитку регіональних ринків ІТ-послуг в Україні, спричинена недостатньою сегментацією ринку, низькою поінформованістю клієнтів і обмеженими можливостями для просування ІТ-послуг на місцевому рівні. Відсутність чіткої сегментації перешкоджає розробці ефективних маркетингових стратегій, знижує конкурентоспроможність компаній і уповільнює прогрес цифрової економіки в регіонах. Проведено аналіз українського ринку ІТ-послуг, який відзначається значними регіональними диспропорціями, та порівняння його з провідними світовими ринками. Доведено, що сегментація ринку ІТ-послуг є важливим інструментом для усунення цих диспропорцій, оскільки вона дозволяє враховувати унікальні економічні, соціальні та інфраструктурні особливості регіонів, сприяючи їх збалансованому розвитку. Дослідження висвітлює ключові бар'єри розвитку регіонального ринку ІТ-послуг в Україні, зокрема обмежені ресурси для маркетингових досліджень, орієнтацію на експорт без уваги до внутрішнього ринку, брак статистики та аналітики локального споживання, низьку цифрову грамотність малого та середнього бізнесу, недостатнє фінансування ІТ-ініціатив, відтік фахівців і слабку інтеграцію в глобальні ланцюги створення вартості. Водночас підкреслюється значний потенціал України, що включає розвиток ІТ-кластерів, зростання попиту на цифрові рішення, активізацію грантових програм від міжнародних організацій та використання технологій штучного інтелекту й великих даних для персоналізації маркетингу. Запропоновано систему критеріїв для сегментації регіонального ринку ІТ-послуг в Україні, яка поєднує традиційні маркетингові підходи та особливості цифрової економіки з урахуванням регіональної нерівномірності. Виділено географічні, економічні, соціально-демографічні, поведінкові, психографічні та інституційні критерії, що дозволяють адаптувати ІТ-послуги до специфіки регіонів. На основі аналізу ринку розроблено матрицю сегментації, яка включає чотири сегменти: лідери цифрової трансформації, регіони з потенціалом зростання, промислові регіони з обмеженим попитом та аутсайдери цифрового ринку. Для кожного сегмента визначено портрети цільових клієнтів (B2B, B2G, B2C) з урахуванням їхніх потреб, обмежень і очікуваних послуг, таких як автоматизація, кібербезпека чи хмарні рішення. Запропоновано диференційовані маркетингові стратегії для кожної цільової аудиторії.

Ключові слова: *ІТ-послуги, маркетингові стратегії, параметри сегментації, регіональний ринок, сегментація ринку, цільова аудиторія.*

D. V. REVENEC
Postgraduate Student at the Management and Administration Department
Zaporizhzhia Polytechnic National University
ORCID: 0009-0005-0917-3252

REGIONAL MARKET SEGMENTATION OF IT SERVICES: MARKETING ANALYSIS AND INFLUENCE TOOLS

The article examines the issue of uneven development of regional IT services markets in Ukraine, driven by insufficient market segmentation, low customer awareness, and limited opportunities for promoting IT services at the local level. The lack of clear segmentation hinders the development of effective marketing strategies, reduces companies' competitiveness, and slows the progress of the digital economy in regions. An analysis of the Ukrainian IT services market, characterized by significant regional disparities, is conducted, alongside a comparison with leading global markets. It is demonstrated that market segmentation is a crucial tool for addressing these disparities, as it enables consideration of the unique economic, social, and infrastructural characteristics of each region, fostering their balanced development. The study highlights key barriers to the development of the regional IT services market in Ukraine, including limited resources for marketing research, a focus on exports at the expense of the domestic market, a lack of reliable statistics and analytics on local consumption, low digital literacy among small and medium-sized businesses, insufficient funding for IT initiatives, brain drain, and weak integration into global value chains. Concurrently, Ukraine's significant potential is emphasized, encompassing the development of IT clusters, growing demand for digital solutions, activation of grant programs from international organizations, and the use of artificial intelligence and big data for personalized marketing. A system of criteria for segmenting the regional IT services market in Ukraine is proposed, combining traditional marketing approaches with the specifics of the digital economy and regional disparities. The criteria include geographic, economic, socio-demographic, behavioral, psychographic, and institutional factors, enabling the adaptation of IT services

to regional specifics. Based on market analysis, a segmentation matrix is developed, identifying four segments: digital transformation leaders, regions with growth potential, industrial regions with limited IT demand, and digital market laggards. For each segment, target customer profiles (B2B, B2G, B2C) are defined, considering their needs, constraints, and expected services, such as automation, cybersecurity, or cloud solutions. Differentiated marketing strategies are proposed for each target audience.

Key words: *IT services, marketing strategies, segmentation criteria, regional market, market segmentation, target audience.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах цифрової трансформації економіки, зростання значення інформаційних технологій в управлінні, виробництві та обслуговуванні стимулює розвиток ІТ-ринку на регіональному рівні. Проте цей розвиток є нерівномірним: регіональні ІТ-компанії стикаються з низкою проблем – від недостатньої інформованості потенційних клієнтів до обмежених можливостей просування своїх послуг на локальних ринках.

Один із ключових викликів полягає у відсутності глибокої сегментації ринку ІТ-послуг, що унеможливлює формування ефективних маркетингових стратегій. Значна частина компаній не використовує потенціал диференційованого підходу до різних груп споживачів, не враховує особливості попиту на ІТ-послуги у конкретному регіоні, що знижує ефективність маркетингових комунікацій, зменшує рівень конкурентоспроможності й обмежує ринкові перспективи.

Недостатня увага до сегментації ринку ІТ-послуг також ускладнює стратегічне планування як для бізнесу, так і для органів місцевого самоврядування, які зацікавлені у розвитку цифрової економіки. Таким чином, постає необхідність у поглибленому маркетинговому аналізі регіонального ринку ІТ-послуг із визначенням доцільних критеріїв сегментації та відповідних інструментів маркетингового впливу на ключові групи споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання сегментації ринку як ключового елементу маркетингової стратегії розглядаються у працях класиків і сучасних дослідників, зокрема Ф. Котлера, Г. Армстронга [4], А. Дейя [11], Ж.-Ж. Ламбена [15], М. Портера [16], які наголошують на важливості ідентифікації цільових сегментів для ефективного позиціонування продукту та побудови комунікацій з клієнтами. Сучасні підходи до сегментації в умовах цифрової економіки розглядають Д. Чаффі та Ф. Елліс-Чадвік [10], які виокремлюють digital-сегментацію, зокрема поведінку онлайн-користувачів, рівень цифрової компетентності, інтенсивність споживання цифрових послуг. Ці підходи особливо актуальні для сфери ІТ-послуг, яка характеризується високим рівнем технологічної складності та гнучкості.

В українському науковому дискурсі сегментацію ринку ІТ-послуг досліджують О. Амоша [1], С. Ілляшенко [3], які аналізують маркетингові аспекти інноваційного розвитку підприємств, А.В. Голидьбіна, Н.В. Язвінська [2], які розглядають особливості просування на ринку ІТ-технологій з урахуванням його специфіки. О.В. Куденко [5], В. Чевганова, В. Васюта [8] та інші дослідники багато уваги приділяють загальними питанням сегментації ринку. Разом із тим, більшість цих досліджень фокусуються на загальноекономічному або інституційному рівні, без глибокого розгляду саме механізмів сегментації ринку ІТ-послуг.

Інші автори, зокрема Яремко С.А. [9] розглядають ринок ІТ-послуг, як інструмент розвитку економіки регіонів та нову сферу діяльності, залишаючи поза увагою питання визначення цільових аудиторій та дослідження їх регіональних особливостей.

Додаткову аналітичну базу досліджень в сфері маркетингу ІТ-послуг формують звіти та дослідження міжнародних і українських організацій. Наприклад, IT Ukraine Association у своїх щорічних оглядах [14] демонструє динаміку розвитку ІТ-індустрії за регіонами, а інші акцентують на важливості цифрових компетенцій у регіональних спільнотах. Проте такі джерела часто мають прикладний, статистичний характер і не завжди пропонують маркетингові рекомендації для окремих сегментів споживачів.

Отже, результати аналізу наукової літератури дають підстави стверджувати, що в наявних дослідженнях спостерігається недостатній рівень розкриття механізмів сегментації регіонального ринку ІТ-послуг. Незважаючи на наявність окремих теоретичних і прикладних напрацювань у цій сфері, відсутні системні дослідження, що б комплексно охоплювали регіональні аспекти сегментування, особливості поведінки споживачів ІТ-послуг на місцевих ринках, а також адаптацію інструментів маркетингового впливу до потреб конкретних цільових груп. Така ситуація обумовлює об'єктивну наукову та практичну потребу в подальшій розробці й систематизації підходів до виділення релевантних ринкових сегментів, удосконаленні критеріїв сегментації та доборі ефективних маркетингових інструментів для забезпечення адресного впливу на споживачів ІТ-послуг у межах окремих регіонів.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є обґрунтування теоретичних засад та розробка практичних рекомендацій щодо ефективної сегментації регіонального ринку ІТ-послуг на основі маркетингового аналізу, з урахуванням специфіки попиту, поведінкових характеристик споживачів та цифрових трансформацій, з метою підвищення результативності маркетингових стратегій та забезпечення цільового впливу на ключові ринкові сегменти.

Викладення основного матеріалу дослідження

Поняття сегментації ринку традиційно визначається як процес поділу ринку на однорідні групи споживачів, що мають подібні потреби або характеристики, з метою створення для кожної з них максимально релевантної маркетингової пропозиції. В класичних та сучасних працях з маркетингу сегментація розглядається як базовий інструмент стратегічного маркетингу, що дозволяє підвищити ефективність позиціонування товару або послуги. Але перш ніж перейти до питань сегментації, необхідно більш ретельно розглянути сам ринок IT-послуг та дослідити його регіональні особливості.

Ринок IT-послуг у XXI столітті став одним із ключових драйверів економічного зростання, цифрової трансформації бізнесу та модернізації державного управління. Його розвиток визначається високим ступенем динамізму, інноваційною спрямованістю та чутливістю до глобальних змін. У сучасних умовах ринок IT-послуг охоплює широкий спектр напрямів – від розробки програмного забезпечення, хмарних технологій, кібербезпеки до системного адміністрування, аналітики великих даних і штучного інтелекту.

На макрорівні IT-послуги розглядаються як важлива складова сектору послуг та індикатор технологічної зрілості економіки. Згідно з даними OECD, частка IT-послуг у ВВП високорозвинених країн коливається в межах 5–10 %, а у структурі експорту – сягає понад 20 % (як у випадку з Ірландією, Естонією, Індією). У США IT-індустрія створює понад 12 млн робочих місць, а доходи від експорту цифрових послуг перевищують $450 млрд на рік. У країнах ЄС ринок IT-послуг є структурно розвинутим та орієнтованим на забезпечення сталого інноваційного розвитку (наприклад, у Німеччині, Нідерландах, Фінляндії) [12, 18].

В Україні, попри військові ризики, IT-сектор демонструє стійке зростання. У 2023 році експорт IT-послуг становив понад $7,3 млрд, що зробило цю галузь однією з ключових для формування валютних надходжень. Частка галузі у ВВП перевищила 4 %, а кількість зайнятих у сфері сягнула близько 300 тис. осіб. Проте цей ринок має свою специфіку – він є переважно експортно-орієнтованим, а внутрішній попит на IT-послуги є нерівномірним і слабо сегментованим. Так, за даними IT Ukraine Association (2024), обсяг внутрішнього ринку IT-послуг в Україні становить лише 15 % від загального обсягу IT-ринку, тоді як 85 % припадає на експорт. Прогнозується, що до 2030 року частка внутрішнього ринку може зрости до 25 % за умови активізації регіональних ініціатив із цифровізації. Зокрема, у регіонах із середнім рівнем IT-інфраструктури (Вінниця, Івано-Франківськ) очікується зростання попиту на IT-послуги на 20–30 % щорічно за рахунок малого бізнесу та муніципальних проєктів [14, 17].

Регіональні ринки IT-послуг в Україні розвиваються нерівномірно та мають суттєві розриви, що продемонстровано на рисунку 1.

Беззаперечним регіональним лідером ринку IT-послуг є Київський регіон, який у 2023 році досяг обсягу ринку в 2500 млн дол. США. Це зумовлено високим рівнем концентрації IT-компаній, розвиненою інфраструктурою (дата-центри, IT-кластери, коворкінги), значним попитом з боку корпоративних клієнтів і високим рівнем цифрової грамотності населення.

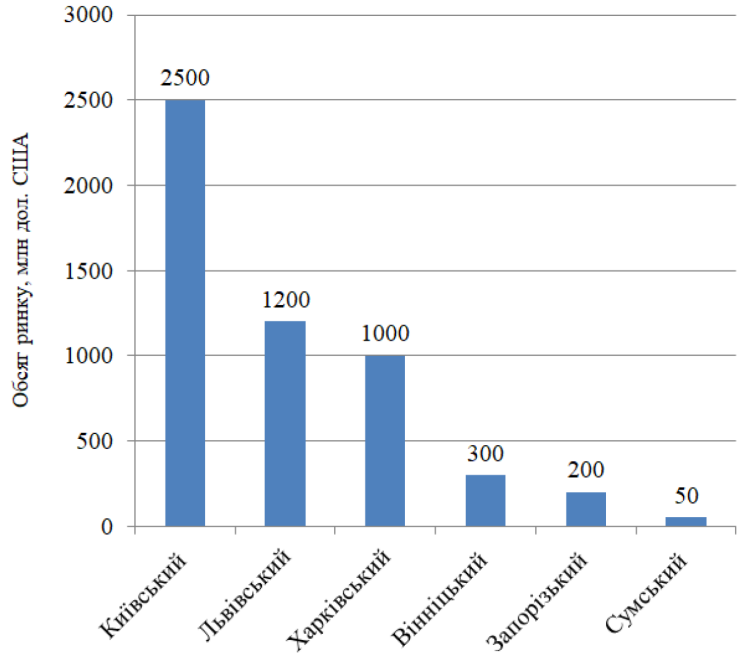


Рис. 1. Розподіл обсягу ринку IT-послуг за регіонами України у 2023 році

Джерело: сформовано на основі [14, 17].

Другим за обсягом є Львівський регіон з показником 1200 млн дол. США, що становить приблизно половину від обсягу Київського ринку. Львів демонструє стійке зростання завдяки активним IT-кластерам, освітнім ініціативам і залученню міжнародних клієнтів. На третьому місці – Харківський регіон з обсягом 1000 млн дол. США, який також є важливим IT-хабом, орієнтованим як на внутрішній, так і на експортний ринки. Всі інші регіони України значно відстають за обсягом угод, мають обмежений попит на IT-послуги, що пов'язано з недостатньою цифровою інфраструктурою, низьким рівнем цифрової грамотності та слабкою інтеграцією місцевих компаній у глобальні ланцюги створення вартості. Така нерівномірність розвитку регіональних ринків IT-послуг створює значні розриви в економічному потенціалі регіонів, що гальмує загальний розвиток цифрової економіки України. Сегментація регіонального ринку IT-послуг є критично важливою для вирівнювання цих розривів. Вона дозволяє:

– ідентифікувати специфічні потреби кожного регіону: наприклад, у промислових регіонах (Запоріжжя, Полтава) попит зосереджений на автоматизації виробництва, тоді як у туристичних регіонах (Закарпаття, Буковина) затребувані рішення для e-commerce та готельного бізнесу;

– адаптувати маркетингові стратегії: у регіонах-лідерах (Київ, Львів, Харків) доцільно застосовувати таргетовану рекламу для B2B-клієнтів і просувати складні рішення, такі як AI чи хмарні технології, тоді як у регіонах-аутсайдерах (Суми, Херсон) ефективними будуть освітні кампанії та пропозиція базових цифрових рішень, як-от створення вебсайтів чи впровадження CRM;

– стимулювати розвиток інфраструктури: сегментація допомагає визначити регіони з потенціалом зростання (Вінниця, Івано-Франківськ), де можна інвестувати в IT-хаби, коворкінги та освітні програми, щоб підвищити попит і залучити нові компанії;

– підвищити ефективність інвестицій: чітке розуміння цільових сегментів дозволяє спрямовувати ресурси (гранти, державні програми, приватні інвестиції) на підтримку тих регіонів і секторів, де вони матимуть найбільший ефект.

Сегментація регіонального ринку IT-послуг є ключовим інструментом для вирівнювання обсягів ринку в Україні, оскільки вона дає змогу врахувати унікальні економічні, соціальні та інфраструктурні особливості кожного регіону. Актуальність сегментації зумовлена значними розривами в розвитку IT-ринку між регіонами-лідерами (Київ, Львів, Харків) та регіонами-аутсайдерами (Суми, Херсон). Застосування диференційованих маркетингових стратегій, адаптованих до потреб конкретних сегментів, сприятиме зростанню попиту на IT-послуги, розвитку місцевих IT-екосистем і залученню інвестицій у регіони з низьким рівнем цифровізації. Це, у свою чергу, сприятиме збалансованому економічному зростанню та зміцненню конкурентоспроможності України на глобальному IT-ринку.

У міжнародній практиці сегментація IT-ринку базується на таких основних критеріях:

а) галузевий принцип (B2B) – орієнтація на бізнес-клієнтів у конкретних галузях: охорона здоров'я, банківська сфера, логістика, освіта, агросектор;

б) рівень технологічної складності – прості сервіси (технічна підтримка, CRM) vs високотехнологічні рішення (AI, blockchain, DevOps);

в) тип клієнта – великі корпорації, стартапи, державні установи;

г) географічний поділ – локальні, національні, транснаціональні клієнти;

д) цифрова поведінка – активність у хмарних сервісах, ступінь цифрової трансформації, наявність IT-команди всередині компанії.

У США та ЄС маркетингова сегментація IT-послуг здійснюється з опорою на аналітику великих даних, поведінкові патерни споживачів, штучний інтелект. Платформи на кшталт Gartner, IDC, Statista регулярно надають оновлені звіти щодо структури попиту, впровадження технологій, тенденцій аутсорсингу.

На відміну від США та ЄС, в Україні ринок IT-послуг тривалий час розвивався без чіткої сегментації. Компанії, особливо на регіональному рівні, часто не мають повної інформації про потреби локальних клієнтів. Низький рівень цифрової грамотності в окремих регіонах, нерівномірний розвиток IT-інфраструктури та недостатній попит з боку малого бізнесу ускладнюють створення цільових пропозицій та створюють бар'єри для розвитку ринку. Серед таких бар'єрів можна виділити:

– обмежені ресурси на маркетингові дослідження;

– орієнтація на іноземних замовників без урахування потенціалу внутрішнього ринку;

– брак якісної статистики щодо локального споживання IT-послуг;

– низький рівень цифрової грамотності серед малого та середнього бізнесу у регіонах, що обмежує попит на складні IT-рішення;

– недостатнє фінансування регіональних IT-ініціатив, зокрема стартапів і локальних інноваційних проєктів;

– відтік IT-фахівців до великих міст або за кордон, що знижує кадровий потенціал у периферійних регіонах.

Водночас Україна має вагомий потенціал, що втілюється у можливостях для розвитку та зростання ринку IT-послуг, серед яких слід відзначити:

– розвиток регіональних IT-кластерів та хабів, які сприяють синергії між бізнесом, освітою та владою;

– зростання попиту на цифрові рішення з боку місцевих громад (наприклад, у рамках проєктів Smart City);

– активізація грантових програм від міжнародних організацій (EU4Digital, USAID) для підтримки цифровізації регіонів;

– використання технологій штучного інтелекту та великих даних для персоналізації маркетингових стратегій.

Отже, регіональна сегментація ринку ІТ-послуг в Україні є ключовою передумовою для ефективного просування ІТ-послуг серед малого та середнього бізнесу, адаптації цифрових рішень до галузевих і культурних особливостей регіону, розробки спеціалізованих пропозицій для органів місцевої влади та ОТГ, формування партнерств між ІТ-компаніями, університетами та локальним бізнесом, а також активізації «цифрового підприємництва» та стартап-екосистем.

На основі проведеного аналізу для сегментації ринку ІТ-послуг з урахуванням регіональних особливостей пропонується застосовувати систему критеріїв, яка охоплює як традиційні маркетингові підходи, так і специфіку цифрової економіки та регіональної нерівномірності. Критерії, їх опис та галузеві приклади наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Критерії сегментації регіонального ринку ІТ-послуг

Критерії	Параметри сегментації	Приклади регіонів
Географічні	Регіональний поділ країни (області, економічні райони, агломерації). Рівень урбанізації (місто-мільйонник, середнє місто, сільська місцевість). Наявність ІТ-інфраструктури (дата-центри, коворкінги, доступність інтернету). Транспортна доступність (для проєктів із фізичним супроводом)	У великих містах (Київ, Львів, Харків) переважають клієнти з потребою у складних хмарних рішеннях, тоді як у менших містах – простіші автоматизаційні сервіси
Економічні	Рівень економічного розвитку регіону (ВРП на душу населення). Пріоритетні галузі в регіоні (агросектор, машинобудування, енергетика, логістика). Рівень діджиталізації бізнесу (наявність електронного документообігу, CRM тощо). Платоспроможність замовників	В індустріальних регіонах попит з боку промислових підприємств на ІТ-послуги для управління виробництвом (ERP, SCM)
Соціально-демографічні	Чисельність населення та його структура. Рівень цифрової грамотності. Освітній потенціал регіону (кількість ІТ-випускників, наявність ІТ-спеціальностей у ЗВО). Міграційні потоки (витік кадрів)	Регіони з розвиненою освітньою базою мають потенціал для створення R&D-офісів
Поведінкові	Цифрові звички клієнтів (онлайн-поведінка, цифрові канали взаємодії). Стадія життєвого циклу бізнесу (startup, scaling, maturity). Ставлення до ІТ-аутсорсингу (власна команда чи підрядники). Частота та обсяг замовлень ІТ-послуг	Компанії, які часто замовляють послуги дизайну або тестування, потребують сервісної моделі з гнучкими контрактами
Психографічні	Цінності бізнесу (інноваційність, сталість, безпека). Готовність до цифрової трансформації. Сприйняття нових технологій (open-source, AI, blockchain)	У прогресивних регіональних ІТ-кластерах можуть формуватися сегменти early adopters (ранні споживачі нових рішень)
Інституційні	Наявність регіональних програм підтримки ІТ. Діяльність кластерів та асоціацій. ІТ-осередки при органах місцевого самоврядування або ЗВО	У регіонах з активною державною підтримкою (ІТ-хаби, гранти, технопарки) – сприятливі умови для B2G- та B2B-сегментів

Джерело: складено автором.

Ґрунтуючись на аналізі ринку ІТ-послуг України [] побудуємо матрицю сегментації ринку ІТ-послуг за регіонами України з формуванням портретів цільових клієнтів для кожного сегмента, яка базується на трьох ключових критеріях: рівень розвитку ІТ-інфраструктури, попит на ІТ-послуги з боку бізнесу та населення та кваліфікаційний потенціал (освіта, ІТ-кадри). Матриця показана в таблиці 2.

Отже, на основі таблиці 2 можна сказати, що портрет цільового клієнта регіонального ринку ІТ-послуг може включати:

– тип клієнта: B2B (бізнес), B2G (державний сектор), B2C (населення);
– цілі / «біль» клієнта: автоматизація, просування онлайн, підвищення ефективності, безпека даних тощо
– обмеження клієнта : бюджет, цифрова грамотність, інфраструктура;
– очікувані послуги: створення сайтів/CRM, кібербезпека, хмарні рішення, ІТ-аутсорсинг, техпідтримка.

Для ефективного просування ІТ-послуг у різних регіонах України необхідно застосовувати диференційовані маркетингові стратегії, адаптовані до специфіки кожного сегмента ринку. У регіонах-лідерах цифрової трансформації, таких як Київ, Львів і Харків, доцільно використовувати таргетовану рекламу в соціальних мережах, зокрема LinkedIn та Instagram, організовувати вебінари й конференції для B2B-клієнтів, а також демонструвати успішні кейси впровадження передових технологій, таких як штучний інтелект і хмарні рішення. У регіонах із потенціалом зростання, як-от Вінниця та Івано-Франківськ, ефективними будуть локальні семінари та воркшопи, спрямовані на підвищення цифрової грамотності малого та середнього бізнесу, а також партнерства з місцевими університетами для просування ІТ-освіти. У промислових регіонах, таких як Запоріжжя та Полтава, варто зосередитися на створенні демонстраційних проєктів автоматизації, наприклад пілотних ERP-систем для заводів, із

Таблиця 2

Матриця сегментації регіонального ринку ІТ-послуг України

Сегмент	Тип регіону	Рівень ІТ-інфраструктури	Попит на ІТ-послуги	Портрет цільового клієнта
1. Лідери цифрової трансформації	Київ, Львів, Харків, Дніпро, Одеса	Високий (кластери, інкубатори, хаби)	Високий (корпорації, стартапи, населення з високим цифровим попитом)	Малий/середній ІТ-бізнес, який шукає просунуті рішення (cloud, big data, AI); корпоративні клієнти, які потребують складних систем
2. Регіони з потенціалом зростання	Вінницька, Івано-Франківська, Чернівецька, Тернопільська, Рівненська	Середній (розвиваються хаби, локальні ініціативи)	Помірний (зростаючий попит від малого бізнесу, місцевої влади)	Муніципальні структури, локальні підприємства, які шукають діджиталізацію; ІТ-компанії, орієнтовані на аутсорс
3. Промислові регіони з обмеженим ІТ-попитом	Запорізька, Кіровоградська, Полтавська, Черкаська	Середній або низький (інфраструктура фрагментарна)	Низький (переважно виробництво, слабкий попит на послуги B2C)	Промислові підприємства, які потребують автоматизації, ERP/CRM; держустанови з потребою в цифровізації послуг
4. Аутсайдери цифрового ринку	Луганська, Херсонська, Миколаївська, Сумська, Житомирська (частково)	Низький (відсутність кластерів, обмежений доступ до ресурсів)	Дуже низький (обмежене споживання, слабкий бізнес)	Навчальні заклади, які впроваджують ІКТ; локальні адміністрації, що потребують базових цифрових рішень

Джерело: складено автором

акцентом на економію витрат у маркетингових кампаніях. Для регіонів-аутсайдерів цифрового ринку, таких як Херсон і Суми, рекомендується проводити освітні кампанії для місцевих адміністрацій, пропонувати недорогі базові рішення, як-от створення вебсайтів чи впровадження CRM, а також залучати грантові програми для цифровізації шкіл і місцевих громад.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує, що сегментація регіонального ринку ІТ-послуг в Україні є критично важливим інструментом для подолання нерівномірності розвитку ІТ-ринку та підвищення конкурентоспроможності як окремих компаній, так і регіональних економік загалом. Аналіз показав значні розриви в обсягах ринку між регіонами-лідерами (Київ, Львів) та регіонами-аутсайдерами (Суми), що зумовлено відмінностями в ІТ-інфраструктурі, попиті на цифрові рішення та рівні цифрової грамотності. Запропонована матриця сегментації, яка дозволяє ідентифікувати цільові групи споживачів і адаптувати маркетингові стратегії до їхніх потреб. Для регіонів-лідерів ефективними є таргетована реклама та просування складних технологій, таких як AI та хмарні рішення, тоді як у регіонах із низьким попитом доцільно зосередитися на освітніх кампаніях і базових цифрових продуктах. Застосування диференційованих маркетингових інструментів, таких як локальні семінари, демонстраційні проєкти автоматизації чи грантові програми, сприяє вирівнюванню ринкових диспропорцій, стимулюванню попиту та розвитку ІТ-екосистем у регіонах. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на аналіз ефективності окремих маркетингових інструментів, прогнозування попиту на ІТ-послуги та вивчення впливу регіональних ІТ-кластерів на економічний розвиток. Таким чином, сегментація регіонального ринку ІТ-послуг не лише підвищує ефективність маркетингових стратегій, але й створює підґрунтя для збалансованого розвитку цифрової економіки України та її інтеграції у глобальний ІТ-ринок.

Список використаної літератури

1. Амоша О. І., Саломатіна Л. М. Інноваційний розвиток промислових підприємств у регіонах: проблеми та перспективи. *Економіка України*. 2017. № 3. С. 20–34. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/EkUk_2017_3_3

2. Голидьбіна А. В., Язвінська Н. В. Особливості сучасного ринку ІТ-послуг та специфіка просування на ньому. *Економічний вісник НТУУ «КПІ»*. 2017. № 14. С. 291–298. DOI: 10.20535/2307-5651.14.2017.108738

3. Ілляшенко С. М. Маркетинг інновацій: монографія. Суми: ВТД «Університетська книга», 2010. 380 с.

4. Котлер Ф., Армстронг Г. Основи маркетингу. 5-е вид. К.: Діалектика, 2020. 880 с.

5. Куденко О. В. Критичний аналіз методів та підходів до сегментування ринку. *Продуктивність агропромислового виробництва: економічні науки*. 2015. № 26. С. 33–38. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pav_2014_26_7

6. Попко О. В., Тивончук П. В. Стратегічний маркетинговий аналіз ринку ІТ-послуг в Україні. *Економіка та суспільство*. 2025. Вип. 71. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-58

7. Серпухов М. Ю., Нестеренко А. О. Маркетингові технології як інструмент активізації розвитку вітчизняних підприємств. *Бізнес-інформ*. 2020. № 11. С. 467–472. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-11-467-472

8. Чевганова В., Васюта В. Роль сегментації ринку у вивченні поведінки споживачів. *Галицький економічний вісник*. 2021. Том 71. № 4. С. 116–122. DOI https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2021.04.116

9. Яремко С. А. Інноваційний розвиток регіону та шляхи його забезпечення. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2020. № 6. С. 76–82. DOI: https://doi.org/10.36818/2071-4653-2020-6-12

10. Chaffey D., Ellis-Chadwick F. Digital Marketing. Strategy, Implementation and Practice. 8th ed. Pearson, 2019. 704 p.
11. Day C. S. Market-driven Strategy. New York. The Free Press, 1990.
12. Digital Economy Reporting. Official Website of the International Trade Administration. URL: https://www.trade.gov/digital-economy-reporting?utm_source=chatgpt.com
13. Europe IT Services Market Size & Trends. 2024. Grand View Research. URL: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/europe-it-services-market-report
14. IT Ukraine Association. Tech Ecosystem Overview 2023. URL: https://itukraine.org.ua
15. Lamben J.-J. Market-Driven Management. Strategic and Operational Marketing. Palgrave Publishers Ltd. 2000. 800 p.
16. Porter M. Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. N. Y. : Free Press, 1985. 592 p.
17. The market power of Ukraine IT. Digital Tiger, 2024. URL: https://itukraine.org.ua/files/DigitalTiger2024.pdf?utm_source=chatgpt.com
18. United States (US) IT Services Market Size, Share, Growth, Analysis & Trends (2025–2030). Mordor Intelligence. URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/united-states-it-services-market?utm_source=chatgpt.com

References

1. Amosha O. I., Salomatina L. M. (2017). Innovatsiinyi rozvytok promyslovykh pidpryiemstv u rehionakh: problemy ta perspektyvy [Innovative development of industrial enterprises in the regions: problems and prospects]. *Ekonomika Ukrainy*, vol. 3, pp. 20–34. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/EkUk_2017_3_3. [in Ukrainian].
2. Holydbina A. V., Yazvinska N. V. (2017). Osoblyvosti suchasnoho rynku IT-posluh ta spetsyfika prosuvannia na nomu [Features of the modern IT services market and the specifics of promotion on it]. *Ekonomichnyi visnyk NTUU "KPI"*, vol.14, pp. 291-298. DOI: 10.20535/2307-5651.14.2017.108738 [In Ukrainian].
3. Illiashenko S. M. (2010). Innovation Marketing: monohrafiia. Sumy: VTD "Universytetska knyha" [In Ukrainian].
4. Kotler F., Armstronh H. (2020). Marketing. 5-ed. K. : Dialektyka [in Ukrainian].
5. Kudenko O. V. (2015). Krytychnyi analiz metodiv ta pidkhodiv do sehmentuvannia rynku [Critical analysis of methods and approaches to market segmentation]. Produktyvnist ahropromyslovoho vyrobnytstva: ekonomichni nauky, vol 26, pp. 33–38. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pav_2014_26_7 [In Ukrainian].
6. Popko O. V., Tyvonchuk P. V. (2025).Stratehichnyi marketynhovyi analiz rynku IT-posluh v Ukraini [Strategic marketing analysis of the IT services market in Ukraine]. *Ekonomika ta suspilstvo*, vol. 71. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-58. [in Ukrainian].
7. Serpukhov M. Yu., Nesterenko A. O. (2020). Marketynhovi tekhnolohii yak instrument aktyvizatsii rozvytku vitchyznianykh pidpryiemstv [Marketing technologies as a tool for activating the development of domestic enterprises]. *Biznes-inform*, vol. 11. pp. 467–472. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-11-467-472 [in Ukrainian].
8. Chevhanova V., Vasiuta V. (2021). Rol sehmentatsii rynku u vyvchenni povedinky spozhyvachiv [The role of market segmentation in studying consumer behavior]. *Halytskyi ekonomichnyi visnyk, t.* 71. vol 4, pp. 116–122. DOI https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2021.04.116 [in Ukrainian].
9. Yaremko S. A. (2020). Innovatsiinyi rozvytok rehionu ta shliakhy yoho zabezpechennia [Innovative development of the region and ways to ensure it]. *Sotsialno-ekonomichni problemy suchasnoho periodu Ukrainy*, vol. 6, pp. 76–82. DOI: https://doi.org/10.36818/2071-4653-2020-6-12 [in Ukrainian].
10. Chaffey D., Ellis-Chadwick F. (2019). Digital Marketing. Strategy, Implementation and Practice. 8th ed. Pearson [in English].
11. Chapman, C. B., & Ward, S. C. (2003). *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights*, 2nd ed. Chichester: Wiley [in English].
12. Day C. S. (1990). Market-driven Strategy. New York. The Free Press [in English].
13. Europe IT Services Market Size & Trends. (2024). Grand View Research. Retrieved from: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/europe-it-services-market-report [in English].
14. IT Ukraine Association. Tech Ecosystem Overview 2023. Retrieved from: https://itukraine.org.ua [in English].
15. Lamben J.-J. (2000). Market-Driven Management. Strategic and Operational Marketing. Palgrave Publishers Ltd. [in English].
16. Porter M. (1985) Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. N. Y. : Free Press. [in English].
17. The market power of Ukraine IT. Digital Tiger, 2024. Retrieved from: https://itukraine.org.ua/files/DigitalTiger2024.pdf?utm_source=chatgpt.com [in English].
18. United States (US) IT Services Market Size, Share, Growth, Analysis & Trends (2025–2030). Mordor Intelligence. Retrieved from: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/united-states-it-services-market?utm_source=chatgpt.com [in English].

УДК 336.145 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.43

С. В. СТУКАНОВ
аспірант кафедри «Менеджмент та адміністрування»
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0009-0007-4575-3654

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ «ЗЕЛЕНИХ» ДЕРЖАВНИХ ЗАКУПІВЕЛЬ В УКРАЇНІ

У статті досліджено теоретичні та практичні аспекти формування системи «зелених» державних закупівель (СПЗ) в Україні як інструменту екологізації державної політики та забезпечення сталого розвитку в умовах глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату, вичерпанням природних ресурсів та зростаючим антропогенним навантаженням на довкілля. Актуальність теми зумовлена фрагментарністю та недостатньою нормативною врегульованістю СПЗ в Україні, а також відсутністю єдиної методології визначення екологічних критеріїв і оцінювання їхньої ефективності. Метою дослідження є обґрунтування теоретичних засад та розробка адаптивної моделі СПЗ, яка враховує міжнародний досвід, особливості національного правового та економічного контексту, а також принципи сталого розвитку.

На основі аналізу сучасних наукових підходів і практик країн ЄС визначено ключові принципи СПЗ: урахування повного життєвого циклу товару чи послуги, забезпечення прозорості процедур, стимулювання попиту на екологічно відповідальну продукцію та інтеграція екологічних критеріїв на всіх етапах закупівельного процесу. Запропоновано модель СПЗ, яка включає чотири взаємопов'язані блоки: принципи, функціональні компоненти (нормативно-правове, інституційне, інформаційне та методичне забезпечення), механізми реалізації (включення вимог сталості до стратегій розвитку, пілотні проєкти, навчання замовників) та індикатори оцінювання ефективності (коефіцієнт екологічної переваги, частка СПЗ, конкурентність тендерів, довгострокові економічні вигоди).

Проведений аналіз свідчить про необхідність гармонізації українського законодавства з європейськими стандартами, створення спеціалізованих інституцій для підтримки СПЗ, розвитку ринку екологічно сертифікованої продукції та впровадження системи навчання для державних замовників. Запропоновано конкретні заходи, зокрема розробку національної концепції СПЗ, оновлення законодавчої бази, створення модуля екологічного моніторингу в системі ProZorro та формування галузевих дорожніх карт. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення державної політики у сфері публічних закупівель, сприяння зеленим інноваціям і реалізації цілей сталого розвитку в Україні.

Ключові слова: *«зелені» державні закупівлі, сталий розвиток, екологізація, життєвий цикл, екологічні критерії, ProZorro, державна політика.*

S. V. STUKANOV
Postgraduate Student at the Management and Administration Department
Zaporizhzhia Polytechnic National University
ORCID: 0009-0007-4575-3654

THEORETICAL PRINCIPLES OF FORMING A SYSTEM OF "GREEN" PUBLIC PROCUREMENT IN UKRAINE

The article examines the theoretical and practical aspects of establishing a system of green public procurement (GPP) in Ukraine as a tool for the ecologization of state policy and the promotion of sustainable development amid global challenges such as climate change, resource depletion, and increasing anthropogenic pressure on the environment. The relevance of the study stems from the fragmented nature and insufficient regulatory framework of GPP in Ukraine, coupled with the lack of a unified methodology for defining environmental criteria and evaluating their effectiveness. The purpose of the research is to substantiate the theoretical foundations and develop an adaptive GPP model that integrates international experience, the specifics of Ukraine's legal and economic context, and the principles of sustainable development.

Based on an analysis of contemporary scientific approaches and practices in EU countries, the key principles of GPP are identified: consideration of the full life cycle of goods or services, ensuring transparency of procedures, stimulating demand for environmentally responsible products, and integrating environmental criteria at all stages of the procurement process. The proposed GPP model comprises four interconnected components: principles, functional elements (regulatory, institutional, informational, and methodological support), implementation mechanisms (incorporating sustainability requirements into development strategies, pilot projects, and training for procurers), and performance evaluation indicators (environmental advantage coefficient, GPP share, tender competitiveness, and long-term economic benefits).

The analysis highlights the need to harmonize Ukrainian legislation with European standards, establish specialized institutions to support GPP, develop a market for environmentally certified products, and implement training programs

for public procurers. Specific measures are proposed, including the development of a national GPP concept, updating the legislative framework, creating an environmental monitoring module within the ProZorro system, and formulating sector-specific roadmaps. The study emphasizes the importance of fostering green innovations and ensuring competitive markets for eco-friendly products to enhance the scalability of GPP in Ukraine.

Key words: *green public procurement, sustainable development, ecologization, life cycle assessment, environmental criteria, ProZorro, state policy.*

Постановка проблеми

В умовах глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату, вичерпанням природних ресурсів та зростаючим антропогенним навантаженням на довкілля, питання екологізації державної політики набуває особливої актуальності. Одним із ефективних інструментів переходу до сталого розвитку є система «зелених» державних закупівель, яка передбачає інтеграцію екологічних критеріїв у процес витрачання бюджетних коштів.

Попри наявність окремих ініціатив і спроб впровадження елементів сталих закупівель в Україні, система «зелених» державних закупівель залишається фрагментарною та нормативно неврегульованою. Недостатній рівень теоретичного обґрунтування, відсутність єдиної методології формування критеріїв «зеленості» та обмеженість аналітичних підходів до оцінювання ефективності таких закупівель гальмують їх розвиток на національному рівні.

Таким чином, постає необхідність формування ґрунтовної теоретичної бази для побудови цілісної системи «зелених» державних закупівель в Україні, з урахуванням світового досвіду, специфіки вітчизняної правової та економічної систем, а також принципів сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика «зелених» або сталих публічних закупівель є відносно новою для української наукової та практичної площини, але активно розвивається під впливом міжнародного досвіду, особливо в межах зобов'язань України з євроінтеграції. Окремі аспекти впровадження концепції «зелених» закупівель у практику публічного управління в Україні розглядалися в роботах Конащук Н. Е., Халіної В. Ю., Буцького В. О., Крицької К. С., Устіловської А. С., Нікітченко Ю., Березіна С., Бузан Г. та інших.

Дослідження Халіної В. Ю., Устіловської А. С. та ін. [8], акцентують увагу на необхідності адаптації механізмів «зелених» публічних закупівель до національних економічних умов. Вони вказують, що ключовими бар'єрами на шляху до впровадження екологічно орієнтованих закупівель є відсутність комплексного правового забезпечення, низький рівень інституційної спроможності державних замовників, а також фрагментарність нормативних підходів до визначення критеріїв «зеленості».

Окремі аспекти впровадження «зелених» публічних закупівель у конкретних секторах економіки, зокрема у сфері будівництва, аналізуються в роботах Халіної В. Ю., Буцького В. О., Крицької К. С. [7]. Автори визначають будівництво як один із найбільш пріоритетних напрямків для запровадження екозакупівель, оскільки саме ця галузь має значний вплив на стан довкілля – через високі обсяги використання енергії, води, матеріалів та утворення відходів. У статті наголошено на потребі врахування повного життєвого циклу об'єкта закупівлі та запровадження системи оцінювання ефективності екозакупівель.

Правові спекти «зелених закупівель» досліджено в роботах Малолітневої В. [4], яка досліджує останні тенденції розвитку законодавства у сфері публічних закупівель.

Вагомий внесок у практичну розробку підходів до «зелених» публічних закупівель здійснено в межах проєкту EaP GREEN, підтриманого Європейським Союзом. Видана «Настанова щодо впровадження сталих публічних закупівель» містить структурований опис процедур, критеріїв сталості, екологічного маркування, вимог до технічної документації та інструментів моніторингу [5]. Документ надає приклади успішного впровадження «зелених» закупівель у різних країнах та містах, що може бути основою для формування національної моделі для Україні.

Попри наявність окремих досліджень та методичних рекомендацій, слід відзначити, що в українському науковому просторі все ще бракує системних досліджень, присвячених теоретичному обґрунтуванню принципів і механізмів формування повноцінної системи «зелених» державних закупівель. Не сформовано загальновизнаних методологічних підходів до оцінювання життєвого циклу продукції, індикаторів ефективності «зелених» публічних закупівель, а також не завершено процес гармонізації екологічних критеріїв із міжнародними стандартами. Отже, актуальним є подальше вивчення теоретичних засад та практичних механізмів впровадження «зелених» закупівель як інструменту екологізації державної політики витрачання бюджетних коштів.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування теоретичних засад формування системи «зелених» державних закупівель в Україні шляхом аналізу сучасних наукових підходів, міжнародного досвіду та чинного національного контексту з метою визначення ключових принципів, структурних елементів і передумов для розробки адаптивної, ефективної та прозорої моделі екологізованого механізму публічних закупівель, що сприятиме реалізації цілей сталого розвитку, екологічної політики та підвищення ефективності державних витрат.

Викладення основного матеріалу дослідження

Упродовж останнього десятиріччя система публічних закупівель в Україні зазнала суттєвих трансформацій, зумовлених необхідністю адаптації до європейських стандартів, гармонізації із правовим полем Європейського Союзу, а також процесами цифровізації та підвищення рівня прозорості, підзвітності й конкурентності тендерних процедур. Запровадження електронної системи закупівель ProZorro, удосконалення нормативно-правового регулювання та розширення інституційної спроможності замовників стали вагомими чинниками модернізації закупівельної політики.

У цьому контексті актуалізується завдання впровадження сталих (або «зелених») публічних закупівель (СПЗ), які розглядаються як стратегічний інструмент державної політики у сфері сталого розвитку. Відповідно до визначення Європейської Комісії, сталими публічними закупівлями вважається процес, у межах якого державні установи здійснюють придбання товарів, робіт і послуг із мінімальним негативним впливом на довкілля протягом усього життєвого циклу продукції порівняно з іншими аналогічними альтернативами [5].

СПЗ базуються на принципах повного життєвого циклу (Life Cycle Costing, LCC), що передбачає врахування не лише початкової вартості товару чи послуги, а й усіх витрат, пов'язаних з його виробництвом, транспортуванням, експлуатацією, обслуговуванням, утилізацією, а також енергоспоживанням, ресурсоємністю, рівнем викидів шкідливих [5, 7, 8]. Таким чином, СПЗ є не лише економічним інструментом, але й важелем реалізації екологічної політики та стимулювання інновацій у виробництві. У країнах ЄС система сталих закупівель функціонує на основі чітко визначених стратегічних галузей, розроблених екологічних критеріїв, регулярного моніторингу ефективності та потужної інституційної підтримки для замовників. Зокрема, у скандинавських країнах (Швеція, Данія, Норвегія) частка закупівель, що здійснюються із дотриманням сталих критеріїв, перевищує 50 %.

Натомість в Україні процес запровадження СПЗ має переважно фрагментарний характер і реалізується переважно у вигляді пілотних проєктів за підтримки міжнародних партнерів, зокрема в межах ініціативи EaP GREEN. Відсутність системного підходу, недостатня координація між інституціями, а також обмежений рівень підготовки замовників стримують масштабування СПЗ на загальнонаціональному рівні.

Ефективна система «зелених» державних закупівель, відповідно до напрацювань європейської та вітчизняної наукової думки, повинна включати такі ключові елементи:

– нормативно-правове забезпечення, що регламентує обов'язковість або створює стимули до застосування екологічних критеріїв у процедурі закупівель;

– методологію оцінки ефективності закупівель з урахуванням повної вартості життєвого циклу та екологічного сліду продукції;

– систему екологічного маркування та сертифікації, що дозволяє ідентифікувати екологічно безпечні товари, послуги та постачальників;

– інституційну інфраструктуру, включаючи органи підтримки, центри консультування, механізми аналітичного супроводу та програми підвищення кваліфікації для замовників.

Разом з тим, вітчизняна практика впровадження СПЗ стикається з низкою системних проблем:

– відсутність чітко закріпленого у законодавстві поняття та механізму реалізації СПЗ;

– недостатній рівень зацікавленості замовників у застосуванні екологічних критеріїв, що зумовлено слабкою інституційною підтримкою, низьким рівнем обізнаності та відсутністю прямих стимулів;

– обмежена розвиненість внутрішнього ринку екологічно сертифікованої продукції, що ускладнює виконання екологічних вимог без штучного обмеження конкуренції;

– дефіцит спеціалізованих навчальних програм для представників державного сектору, які відповідають за організацію закупівель, а також відсутність доступних методичних рекомендацій щодо інтеграції екологічних критеріїв у закупівельну документацію.

На основі узагальнення світових і національних підходів доцільно виокремити такі ключові принципи побудови системи СПЗ в Україні:

а) Принцип життєвого циклу, який надає пріоритет товарам із найменшим сумарним екологічним слідом протягом усього життєвого циклу;

б) Принцип прозорості та відкритості, за якого уся інформація про екологічні характеристики продукції повинна бути доступною на етапі тендеру;

в) Принцип стимулювання попиту – через податкові, фінансові або квотні механізми заохочення екологічно відповідальних постачальників;

г) Принцип інтеграції – інтеграція екологічних критеріїв в усі етапи закупівельного процесу: від планування, тендерна документація, оцінка пропозицій, укладання договору.

В таблиці 1 наведено приклад реалізації цих принципів в публічних закупівлях, що необхідність комплексного підходу до формування екологічно орієнтованої політики державного споживання.

Таблиця 1

Ключові принципи зелених публічних закупівель: зміст, приклади, критерії та стандарти

Принцип	Суть	Приклад реалізації	Типові екологічні критерії (відповідні стандарти)
Життєвого циклу	Оцінювання екологічного та економічного впливу товару/ послуги протягом усього життєвого циклу	Закупівля принтерів, у яких враховується споживання електроенергії, обсяг відходів та утилізація	– енергоефективність (ISO 14040 (LCA); – можливість повторного використання (Європейський стандарт EN 50600-99); – низьке споживання ресурсів (EU Green Public Procurement (GPP) Criteria).
Прозорості та відкритості	Надання відкритої, перевіреної інформації про екологічні характеристики продукції в тендерній документації	Включення сертифікатів екологічного маркування (еколейблів) до умов закупівлі	– наявність екосертифіката (наприклад, Ecolabel ISO 14024 (екологічне маркування типу I); – декларація про склад, викиди тощо (Eco-Management and Audit Scheme).
Стимулювання попиту	Використання фінансових, податкових або квотних механізмів для підтримки екологічно відповідальних учасників ринку	Надання преференцій у тендері постачальникам, які впроваджують екотехнології або мають сертифіковану систему екоменеджменту	– бонусні бали за відповідність екологічним критеріям (ISO 14001 (Environmental Management Systems); – екологічне маркування типу II (ISO 14021); – знижені збори або податки для екопостачальників (Зелені податкові пільги в ЄС)
Інтеграції	Впровадження екологічних вимог на всіх етапах закупівельного процесу: планування, техзавдання, оцінка пропозицій, контракт	У сфері будівництва – врахування екологічних вимог до матеріалів у специфікації, оцінці пропозицій та при укладанні договору	– вимоги до енергоефективності (EU GPP Toolkit); – вміст вторинної сировини (ISO 20400 – Sustainable Procurement); – вимоги до логістики та упаковки (CEN/TC 350 – оцінка сталості будівельних матеріалів).

Джерело: сформовано на основі [1, 2, 10–15].

Кожен із чотирьох розглянутих принципів відіграє критично важливу роль у формуванні сталої системи закупівель, проте вимагає специфічних умов реалізації.

Для реалізації зазначених принципів необхідно розробити індикаторну модель оцінювання ефективності впровадження СПЗ, яка б включала:

– коефіцієнт екологічної переваги – співвідношення оціненого негативного екологічного впливу традиційної продукції до впливу «зеленої» альтернативи (може виражатись у зниженні CO_2, зменшенні споживання енергії, води, токсичних речовин) – дає змогу оцінити екологічний ефект від заміни звичайної продукції екологічно вигідною;

– обсяг закупівель із «зеленими» критеріями – частка СПЗ у загальному обсязі закупівель, виражена у % (за кількістю процедур або обсягом витрачених коштів) – відображає масштаб впровадження СПЗ у практиці державних замовників;

– середню кількість учасників на тендері СПЗ – середнє число пропозицій, поданих на тендери з екологічними критеріями – характеризує рівень конкурентності ринку екотоварів та доступність таких закупівель для бізнесу;

– оцінку довгострокових економічних вигід (LCC) – розрахунок вартості повного життєвого циклу (витрати на придбання, використання, обслуговування, утилізацію тощо) порівняно з альтернативними варіантами – дає змогу виміряти економічну доцільність СПЗ не лише в короткостроковому, а й у стратегічному вимірі.

На основі узагальнення наявних наукових підходів та міжнародних практик пропонується структура моделі формування системи СПЗ, яка ґрунтується на чотирьох базових елементах представлених на рисунку 1.

Запропонована модель формування системи СПЗ побудована як цілісна структура, що поєднує теоретико-методологічні засади, практичні інструменти та індикатори оцінки. Вона складається з чотирьох взаємопов'язаних блоків, які забезпечують системність, ефективність і адаптивність екологізованої закупівельної політики.

Першим ключовим елементом моделі виступає блок принципів системи СПЗ, який формує теоретико-ціннісне підґрунтя та визначає ідеологію екологізованого підходу до публічних закупівель. До таких принципів відносяться: урахування повного життєвого циклу товару чи послуги при прийнятті закупівельних рішень; забезпечення прозорості та відкритості процедур, включно з доступністю інформації про екологічні характеристики предмета закупівлі; створення економічних і регуляторних стимулів для екологічно відповідальних учасників ринку; а також інтеграція екологічних вимог в усі етапи закупівельного процесу – від планування до контролю за виконанням договору. Ці принципи забезпечують узгодженість моделі з підходами, закладеними в стратегічних документах ЄС щодо зеленої трансформації.

Другим складником моделі є блок функціональних компонентів, які відображають інституційно-організаційну основу реалізації СПЗ. До них належать: нормативно-правове забезпечення, що передбачає закріплення у законодавстві базових положень щодо екологічних вимог у сфері закупівель; інституційний рівень, який охоплює створення спеціалізованих органів чи підрозділів у системі публічних закупівель (наприклад, національного центру підтримки СПЗ); інформаційна база, що передбачає формування реєстрів екологічно сертифікованих товарів, постачальників та типових екологічних вимог; а також методичне забезпечення – включно з розробкою типових



Рис. 1. Пропонована модель формування системи сталих публічних закупівель

технічних специфікацій, інструкцій, шаблонів тендерної документації та методики оцінювання повної вартості життєвого циклу (LCC).

Третім блоком моделі є механізми реалізації, що відображають конкретні інструменти впровадження СПЗ у практику державного управління. Зокрема, йдеться про включення вимог сталості до стратегій соціально-економічного розвитку на регіональному та галузевому рівнях, запровадження пілотних ініціатив на базі міністерств, органів місцевого самоврядування або держпідприємств, а також організацію системного навчання державних замовників, підвищення їхньої обізнаності щодо екологічних аспектів закупівель. Особливу роль відіграє інформаційно-просвітницька кампанія, спрямована як на представників бізнесу, так і на широку громадськість, що дозволяє формувати запит на екологічну відповідальність у державному споживанні.

Завершальним елементом виступає блок індикаторів оцінювання ефективності впровадження СПЗ, що забезпечує можливість кількісного моніторингу результатів та обґрунтування управлінських рішень. До ключових індикаторів належать: частка закупівель, здійснених із застосуванням екологічних критеріїв; обсяг скорочення викидів парникових газів і використання ресурсів унаслідок реалізації СПЗ; кількість постачальників, які відповідають екологічним вимогам; а також оцінка довгострокових економічних вигід на основі аналізу життєвого циклу. Систематичне застосування цих індикаторів дозволить забезпечити прозорість і підзвітність реалізації політики сталих закупівель та стане основою для її подальшого вдосконалення.

Проведений аналіз свідчить, що формування системи «зелених» державних закупівель в Україні є нагальним кроком до інтеграції екологічних підходів у бюджетну політику. Теоретичне осмислення СПЗ дозволяє розглядати їх як стратегічний інструмент державного управління, що поєднує економічні, соціальні та екологічні пріоритети.

Для забезпечення практичної реалізації запропонованої моделі необхідно:

– розробити та затвердити національну концепцію «зелених» закупівель;
– оновити законодавчу базу з урахуванням екологічних критеріїв;
– сформувати державну інституцію/офіс підтримки СПЗ з аналітичними, навчальними та координуючими функціями;
– впровадити єдиний електронний інструмент (модуль) екологічного моніторингу закупівель у системі ProZorro;
– створити систему навчання та сертифікації замовників з питань СПЗ.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на формування галузевих дорожніх карт із впровадження СПЗ, вивчення потенціалу ринку екологічної продукції та розробку показників оцінювання ефективності реалізації екологізованої закупівельної політики.

Висновки

Формування системи «зелених» державних закупівель в Україні є важливим кроком на шляху до екологізації державної політики та забезпечення сталого розвитку. Проведений аналіз теоретичних засад, міжнародного досвіду та сучасного національного контексту засвідчує, що ефективна модель СПЗ має ґрунтуватися на комплексному підході, який поєднує чітке нормативно-правове регулювання, методологічне забезпечення, інституційну підтримку та прозорі механізми оцінювання ефективності. Запропонована модель, що включає принципи життєвого циклу, прозорості, стимулювання попиту та інтеграції екологічних критеріїв, створює основу для системного впровадження СПЗ в Україні. Ключовими передумовами успішної реалізації СПЗ є гармонізація національного законодавства з європейськими стандартами, створення спеціалізованих інституцій для підтримки закупівель, розвиток ринку екологічно сертифікованої продукції та підвищення кваліфікації державних замовників. Запровадження індикаторної моделі оцінювання, що враховує екологічні, економічні та конкурентні аспекти, дозволить забезпечити прозорість і підзвітність процесу, а також оцінити довгострокові вигоди від екологізованих закупівель.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку галузевих стратегій впровадження СПЗ, створення єдиних методик оцінки життєвого циклу продукції та вдосконалення системи моніторингу закупівель у системі ProZorro. Реалізація запропонованих заходів сприятиме не лише зниженню негативного впливу на довкілля, а й підвищенню ефективності державних витрат, стимулюванню інновацій та формуванню екологічно відповідального суспільства.

Список використаної літератури

1. Екологічні маркування та декларації. Екологічне маркування типу I: ISO 14024:2018. Принципи та методи. URL: https://www.ecolabel.org.ua/iso-14024-2018. (дата звернення 10.05.2025 р.).
2. Екологічні маркування та декларації. Екологічне маркування типу II: ISO 14021. Принципи та методи. URL: https://www.ecolabel.org.ua/iso-14021-dstu-iso-14021. (дата звернення 10.05.2025 р.).
3. Конащук Н. Е. Використання «зелених» критеріїв під час здійснення публічних закупівель. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія», серія «Економіка»*. 2016. Вип. 3(31). С. 133–136.
4. Малолітнева В. «Зелені» й соціально відповідальні закупівлі держави: посилення публічних начал у правовому регулюванні та нові умови міжнародної конкуренції. *Господарське право і процес*. 2021. № 3. С. 99–107. DOI: https://doi.org/10.32849/2663-5313/2021.3.16
5. Нікітченко Ю., Березіна С., Бузан Г. Настанова щодо впровадження сталих публічних закупівель. Інтеграція критеріїв сталості в процедури публічних закупівель. К. 2016. 125 с. URL: https://www.ecolabel.org.ua/images/page/Handbook%20SPP_UA.pdf. (дата звернення 10.05.2025 р.).
6. Про внесення змін до Закону України «Про публічні закупівлі» та деяких інших законодавчих актів України щодо вдосконалення публічних закупівель» : Закон України від 19 вересня 2019 р. № 114-IX / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/114-20 (дата звернення: 15.04.2025).
7. Халіна В. Ю., Буцький В. О., Крицька К. С. Публічні екозакупівлі: організаційно-економічні засади впровадження та здійснення. Економічний простір. 2019. № 154. С. 56–60. DOI: https://doi.org/10.32782/2224-6282/154-10
8. Халіна В. Ю., Устіловська А. С., Гончаренко П. І., Вєтрова В. В. Адаптація механізму впровадження «зелених» закупівель до вітчизняних економічних умов. *Ефективна економіка*. 2019. № 14. DOI: https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.4.52
9. Як зелені публічні закупівлі запобігають кліматичним змінам. Всеукраїнська громадська організація «Жива планета». Оіційнй вебсайт. URL: https://www.livingplanet.org.ua/novuny/yak-zeleni-publichni-zakupivli-zapobigayut-klimatichnim-zminam (дата звернення 15.05.2025 р.).
10. EaP GREEN. Official website UNECE. URL: https://unece.org/eap-green (assessed at May 2025).
11. Energy Management and Environmental Viability of Data Centres. 2021. 20 p. URL: https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/AreasOfWork/CEN%20sectors/Digital%20Society/Green%20Data%20Centres/brochuredatacentrestandardizationedition8_2021.pdf. (assessed at May 2025).
12. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ISO Standarts. URL: https://www.iso.org/standard/37456.html. (assessed at May 2025).
13. ISO 14001:2015Environmental management systems – Requirements with guidance for use. ISO Standarts. URL: https://www.iso.org/standard/60857.html (assessed at May 2025).
14. Green Public Procurement: Catalysing the Net-Zero Economy. White paper. 2022. 33 p. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Green_Public_Procurement_2022.pdf. (assessed at May 2025).
15. GPP Training toolkit. European Commission. 2014. URL: https://sustainable-procurement.org/fileadmin/user_upload/layout/homepage/NGO_Network/Presentations/GPP_Training_Toolkit.pdf. (дата звернення: 15.04.2025).

References

1. Ekolohichni markuvannia ta deklaratsii. Ekolohichne markuvannia typu I: ISO 14024:2018. Pryntsypy ta metody. Retrieved from: https://www.ecolabel.org.ua/iso-14024-2018 [in Ukrainian].

2. Ekolohichni markuvannia ta deklaratsii. Ekolohichne markuvannia typu II: ISO 14021. Pryntsypy ta metody. Retrieved from: https://www.ecolabel.org.ua/iso-14021-dstu-iso-14021[In Ukrainian].

3. Konashchuk N. E. (2016) Vykorystannia «zelenykh» kryteriiv pid chas zdiisnennia publichnykh zakupivel. [Using «green» criteria in public procurement]. *Naukovi zapysky Natsionalnoho universytetu "Ostrozka akademiia", seriia "Ekonomika"*, vol. 3(31), pp. 133–136.

4. Malolitneva V. (2021) "Zeleni" y sotsialno vidpovidalni zakupivli derzhavy: posylennia publichnykh nachal u pravovomu rehuliuvanni ta novi umovy mizhnarodnoi konkurentsii. ["Green" and socially responsible public procurement: strengthening the state regulation and defining new international competition terms and conditions]. *Hospodarske pravo i protses, vol*.3, pp. 99–107. DOI: https://doi.org/10.32849/2663-5313/2021.3.16 [In Ukrainian].

5. Nikitchenko Yu., Berezina S., Buzan H. (2016) Nastanova shchodo vprovadzhennia stalykh publichnykh zakupivel. Intehratsiia kryteriiv stalosti v protsedury publichnykh zakupivel. 125 p. Retrieved from: https://www.ecolabel.org.ua/images/page/Handbook%20SPP_UA.pdf. [in Ukrainian].

6. Zakon Ukrainy "Pro vnesennia zmin do Zakonu Ukrainy "Pro publichni zakupivli» ta deiakykh inshykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo vdoskonalennia publichnykh zakupivel" vid 19 veresnia 2019 r. № 114-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/ show/114-20 [In Ukrainian].

7. Khalina V. Iu., Butskyi V. O., Krytska K. S. (2019) Publichni ekozakupivli: orhanizatsiino-ekonomichni zasady vprovadzhennia ta zdiisnennia [Public green procurement: organizational and economic principles of implementation and implementation]. *Ekonomichnyi prostir, vol*. 154, pp. 56–60. DOI: https://doi.org/10.32782/2224-6282/154-10 [in Ukrainian].

8. Khalina V. Iu., Ustilovska A. S., Honcharenko P. I., Vietrova V. V. (2019) Adaptatsiia mekhanizmu vprovadzhennia "zelenykh" zakupivel do vitchyznianykh ekonomichnykh umov [Adaptation of the mechanism for implementing "green" procurement to domestic economic conditions]. *Efektyvna ekonomika*, vol. 14. DOI: https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.4.52 [in Ukrainian].

9. Yak zeleni publichni zakupivli zapobihaiut klimatychnym zminam. Vseukrainska hromadska orhanizatsiia "Zhyva planeta". Oitsiini vebsait. Retrieved from: https://www.livingplanet.org.ua/novuny/yak-zeleni-publichni-zakupivli-zapobigayut-klimatichnim-zminam [in Ukrainian].

10. EaP GREEN. Official website UNECE. Retrieved from: https://unece.org/eap-green [in English].

11. Energy Management and Environmental Viability of Data Centres (2021). Retrieved from: https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/AreasOfWork/CEN%20sectors/Digital%20Society/Green%20Data%20Centres/brochuredatacentrestandardizationedition8_2021.pdf [in English].

12. ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. ISO Standarts. Retrieved from: https://www.iso.org/standard/37456.html [in English].

13. ISO 14001:2015Environmental management systems – Requirements with guidance for use. ISO Standarts. Retrieved from: https://www.iso.org/standard/60857.html [in English].

14. Green Public Procurement: Catalysing the Net-Zero Economy. White paper (2022). Retrieved from: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Green_Public_ Procurement_2022.pdf [in English].

15. GPP Training toolkit. European Commission (2014). Retrieved from: https://sustainable-procurement.org/fileadmin/user_upload/layout/homepage /NGO_Network/Presentations/GPP_Training_Toolkit.pdf [in English].

УДК 351:332.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.44

О. В. ТЕЛЮК
аспірант кафедри «Менеджмент та адміністрування»
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0009-0005-1628-8066

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЗМІВ РЕАЛІЗАЦІЇ ДЕРЖАВНОЇ РЕГІОНАЛЬНОЇ ПОЛІТИКИ НА ОСНОВІ ЦИФРОВІЗАЦІЇ

У статті розглянуто цифровізацію як стратегічний вектор удосконалення механізмів реалізації державної регіональної політики в Україні в умовах повномасштабної війни, соціально-економічних трансформацій та інтеграційних процесів з Європейським Союзом. Обґрунтовано, що цифрова трансформація є не лише інструментом технічного оновлення, а й чинником формування нової управлінської парадигми, орієнтованої на дані, відкритість, адаптивність та інклюзивність. У межах дослідження проаналізовано сучасні цифрові інструменти, що можуть бути інтегровані в систему реалізації регіональної політики: геоінформаційні системи (GIS), Big Data, електронне стратегічне планування, платформи електронної демократії, смарт-контракти, елементи штучного інтелекту, цифрові панелі моніторингу та участі громадян. Виділено ключові напрями цифровізації: електронне планування, автоматизоване управління регіональними програмами, створення цифрових хабів, розвиток Smart Participation, застосування цифрових індикаторів оцінки політики. Проаналізовано зарубіжний досвід (Естонія, Польща, Німеччина), що підтверджує ефективність інтеграції цифрових підходів у регіональне управління. Обґрунтовано можливість адаптації найкращих практик до українських реалій, особливо в умовах постконфліктної реконструкції та обмежених ресурсів. Окреслено бар'єри, що стримують цифрову трансформацію: фрагментарність законодавства, недостатня цифрова компетентність управлінців, дефіцит фінансування, високі кіберризики. Запропоновано комплекс заходів щодо формування національної політики цифрового управління регіональним розвитком, включно зі створенням концепції «Smart Region Ukraine», цифрового стратегічного модулю, єдиного порталу розвитку територій, системи цифрової звітності та участі громад. Зазначено, що цифрова трансформація має стати наскрізним принципом оновлення державної регіональної політики, забезпечуючи її ефективність, гнучкість та стійкість до криз. Визначено напрями подальших досліджень, серед яких – оцінка цифрової зрілості регіонів, аналіз ефективності цифрової участі, впровадження AI, інституційна модель управління на базі ІКТ та правове забезпечення цифрових реформ.

Ключові слова: *державна регіональна політика, інновації, механізм, регіональний розвиток, стратегічне планування, цифровізація.*

O. V. TELIUK
Postgraduate Student at the Management and Administration Department
Zaporizhzhia Polytechnic National University
ORCID: 0009-0005-1628-8066

IMPROVEMENT OF MECHANISMS FOR IMPLEMENTING STATE REGIONAL POLICY ON THE BASIS OF DIGITALIZATION

The article considers digitalization as a strategic vector for improving the mechanisms of implementation of state regional policy in Ukraine under the conditions of full-scale war, socio-economic transformation, and integration with the European Union. It is substantiated that digital transformation represents not only a technological innovation but also a key factor in forming a new governance paradigm focused on data, openness, adaptability, and inclusiveness. The study analyzes modern digital tools that can be integrated into the regional policy implementation system: geographic information systems (GIS), Big Data analytics, electronic strategic planning, e-democracy platforms, smart contracts, artificial intelligence solutions, digital dashboards, and citizen participation modules. Key directions of digital transformation are identified, including electronic planning, automated program management, the creation of digital hubs, smart participation models, and the use of digital indicators for public policy evaluation. The paper explores international practices (Estonia, Poland, Germany) that demonstrate the effectiveness of integrating digital approaches into regional governance and offers their adaptation for the Ukrainian context, especially during post-war recovery. Barriers to effective digitalization are discussed: fragmented legal framework, insufficient digital competence among public servants, underfunding, and high cybersecurity risks. A set of strategic solutions is proposed, including the development of the "Smart Region Ukraine" concept, implementation of digital strategic modules, creation of a unified development portal, digital reporting tools, and participatory governance frameworks. It is concluded that digital transformation should serve as a cross-cutting principle in renewing state regional policy, enhancing its efficiency, flexibility, and crisis resilience. Directions for further research include assessing digital maturity of regions, evaluating the impact of digital participation, implementation of AI-based decision support, institutional modeling based on ICT, and legal regulation of digital reforms.

Key words: *state regional policy, innovations, mechanism, regional development, strategic planning, digitalization.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах дії повномасштабної війни, руйнування інфраструктури, порушення економічних зв'язків, масштабного внутрішнього переміщення населення та значних демографічних втрат державна регіональна політика набуває особливого значення як стратегічний інструмент відновлення, стабілізації та сталого розвитку територій України. Цей процес ускладнюється зростанням дисбалансів між регіонами, посиленням соціальної напруги, втратою ресурсного потенціалу, зростанням екологічних загроз, а також різним рівнем інституційної спроможності місцевого самоврядування.

Окрім класичних викликів, постали нові: необхідність інтеграції сотен тисяч внутрішньо переміщених осіб, переналаштування логістичних ланцюгів, подолання енергетичної кризи в регіонах, трансформація промислових центрів, наближених до лінії фронту. Водночас можливості інноваційного розвитку та цифрової трансформації відкривають вікно можливостей для якісного оновлення регіональної політики. Однак на практиці ефективність реалізації державної регіональної політики обмежується рядом системних недоліків: слабкою міжрівневою координацією, фрагментарністю інструментів реалізації, відсутністю гнучкого механізму реагування на динамічні виклики та, зокрема, недостатнім використанням потенціалу цифрових технологій у плануванні, реалізації та моніторингу політики. Крім того, наявні механізми реалізації не враховують повною мірою принципів сталого розвитку, цифрового доброчесного врядування та адаптивності до надзвичайних ситуацій.

У цьому контексті актуальним є переосмислення наявних підходів до механізмів реалізації державної регіональної політики з урахуванням цифрової трансформації, що передбачає поєднання інституційних, фінансових, екологічних, соціальних та інноваційних інструментів. Формування комплексної, прозорої, адаптивної та орієнтованої на дані системи управління розвитком регіонів України є не лише стратегічною потребою на шляху до післявоєнного відновлення, а й важливою умовою інтеграції до європейського простору управлінських стандартів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання реалізації державної регіональної політики є предметом постійної уваги як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників. Проблематика функціонування та удосконалення механізмів цієї політики знайшла відображення у працях таких українських науковців, як З. Варналій, Н. Васильєва, М. Долішній, А. Кінщак, Т. Краснопольська, А. Лелеченко, К. Пастух, В. Пухкий, Н. Попадинець, А. Попазогло, Ю. Харченко, С. Шульц, та ін.

Аналіз наукових праць свідчить про широке висвітлення загальних питань сутності державної регіональної політики, зокрема В. Пухкий [1] розглядає сутність та принципи реалізації; С. Шульц [2] приділяє багато уваги механізмам реалізації, оцінці ефективності та напрямам вдосконалення; А. Лелеченко [3] робить акцент на механізм реалізації регіональної політики сталого розвитку. Значна група дослідників багато уваги приділяє окремим напрямкам регіонального розвитку, так К. Пастух всебічно розглядає механізм реалізації соціально-економічної регіональної політики [4]; П. Гудзь, В. Іванченков, Ю. Олійник [5] досліджують роль інноваційних соціальних технологій в системі регіонального управління. Також чисельні роботи присвячені економічним, інституційним, інноваційним, фінансовим, управлінським та іншим аспектам механізму реалізації державної регіональної політики у контексті глобальних викликів, інтеграції з ЄС, сталого розвитку.

Водночас цифрова складова, незважаючи на декларативне закріплення у стратегіях цифрової трансформації, в науковому полі залишається на периферії. Здебільшого, наявні публікації розглядають цифровізацію як загальнонаціональний тренд, не вдаючись у деталізацію застосування цифрових інструментів на рівні регіонального управління. Недостатньо розкритими залишаються питання інституційного впровадження смарт-рішень, електронного стратегічного планування, застосування *Big Data* для моніторингу програм розвитку, а також цифрової участі громад у процесах прийняття регіональних рішень.

Крім того, майже повністю відсутній аналіз використання цифрових технологій у регіонах, що постраждали від бойових дій або тимчасової окупації, а також оцінка їх потенціалу в післявоєнному відновленні. Немає комплексного бачення місця цифрових механізмів у структурі реалізації регіональної політики – як системи управління, так і системи впливу.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування потенціалу цифрових технологій у механізмах реалізації державної регіональної політики та окреслення шляхів їх інтеграції на практичному рівні.

Викладення основного матеріалу дослідження

Один із найактуальніших напрямів удосконалення механізму державної регіональної політики сьогодні є цифровізація системи публічного управління. Цифрові технології дозволяють забезпечити прозорість, швидкодію, інклюзивність та ефективність ухвалення управлінських рішень, що є критично важливим у період відбудови країни та відновлення довіри до влади. У межах державної регіональної політики цифрові інструменти можуть стати потужним каталізатором для комплексного управління розвитком територій, підвищення результативності програмно-цільового підходу, розширення громадської участі та зміцнення міжрівневої координації.

У теоретичному сенсі цифровізація регіонального управління – це процес впровадження інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) у всі етапи планування, реалізації, моніторингу та оцінювання регіональної політики. Мова йде про використання таких інструментів, як:

– геоінформаційні системи (*GIS*) для просторового планування;
– *Big Data* та аналітичні панелі для оцінки ефективності політик;
– електронне стратегічне планування та прогнозування;
– цифрові платформи для публічної участі та електронної демократії;
– смарт-контракти у публічних закупівлях та міжбюджетних трансфертах;
– системи автоматизованого моніторингу (наприклад, бюджетних показників або соціальних індикаторів).

Інтеграція таких інструментів дає змогу перейти від адміністративного до інтелектуального управління регіонами, де рішення не ухвалюються «вручну» та реактивно, а ґрунтуються на алгоритмах, моделях та аналітичних оцінках.

Узагальнюючи існуючі публікації щодо використання цифровізації в державному управлінні [6-11] можна виділити такі напрямки удосконалення механізмів реалізації регіональної політики:

1. Електронне планування та стратегування. Цифрові інструменти дозволяють створити динамічні платформи розробки, узгодження та реалізації стратегій регіонального розвитку. Платформи типу *SMART-Strategy, EPSON* та інші можуть включати модулі участі громадськості в оцінці стратегічних цілей, інтеграцію карт соціально-економічного потенціалу регіонів, моделювання сценаріїв на основі історичних та прогнозованих даних. Завдяки електронному плануванню усувається суб'єктивізм при розподілі ресурсів та підвищується адаптивність політик до зовнішніх змін.

2. Інформаційна підтримка управлінських рішень. Використання систем *Business Intelligence (BI)* у регіональному управлінні дозволяє проводити прогнозування бюджетних надходжень, аналізувати динаміку показників розвитку в реальному часі, формувати системи раннього попередження про кризові явища. Такі рішення вже застосовуються в окремих громадах – наприклад, у Вінницькій чи Львівській областях, але досі відсутня їх повна інтеграція у державні механізми.

3. Цифрова участь. Один із ключових викликів державної регіональної політики – залучення громадян до ухвалення рішень. Цифрові інструменти дозволяють перейти до моделі «*Smart Participation*»: платформи для бюджету участі, *crowdsourcing*-ініціативи у формуванні локальних пріоритетів, цифрові опитування в режимі реального часу, публічні панелі контролю за реалізацією програм. Це сприяє формуванню довіри, підзвітності й ефективному розподілу ресурсів.

4. Інноваційна регіональна екосистема. В межах цифровізації варто говорити про створення цифрових хабів (центрів розвитку інноваційної економіки), які стануть осередками підтримки стартапів, навчання цифровим навичкам, впровадження пілотних *smart*-рішень для муніципального управління. Такі екосистеми здатні перетворити регіони на генератори цифрового розвитку замість отримувачів централізованої допомоги.

В контексті інтеграції України до ЄС доцільно вивчити досвід окремих країн Європи щодо впровадження цифрових рішень для удосконалення механізмів державного управління, які стали невід'ємною частиною регіональної політики. Так, Естонія інтегрувала цифрові послуги для муніципалітетів у межах системи *X-Road*, Польща активно застосовує платформу TERYT для просторового планування, Німеччина запровадила «*Smart Region Programme*», яка підтримує впровадження цифрових сервісів в малих громадах [12–14]. Україна лише починає цей шлях, тому важливо адаптувати ці практики з урахуванням національних реалій, зокрема поствоєнної реконструкції.

Попри очевидні переваги цифровізації, в Україні існують бар'єри, які гальмують інтеграцію цифрових рішень у механізми реалізації регіональної політики:

– фрагментарність законодавчого поля щодо е-врядування на регіональному рівні;
– слабка цифрова грамотність кадрів органів влади;
– нестача фінансування для розробки та масштабування систем;
– ризики кібербезпеки, особливо в умовах війни.

Ці обмеження потребують системної політики – як з боку центральної влади, так і місцевого самоврядування.

Для ефективної цифровізації механізмів реалізації державної регіональної політики доцільно:

1. Розробити державну концепцію «*Smart Region Ukraine*», яка поєднає стратегічне бачення цифрового управління регіонами.

2. Інституалізувати електронне стратегічне планування, обов'язкове до застосування при розробці регіональних стратегій.

3. Створити міжрегіональні платформи обміну цифровими практиками, зокрема через Агенції регіонального розвитку.

4. Інтегрувати цифрові компоненти в державні програми відновлення, як-от єПідтримка, єРеконструкція, тощо.

5. Підвищити цифрову компетентність регіональних управлінців через систему підвищення кваліфікації з ІКТ.

У процесі формування механізмів реалізації державної регіональної політики цифровізація має розглядатися не лише як набір технічних засобів, а як інноваційна трансформація логіки управління, орієнтована на дані (*data-driven governance*), відкритість (*open government*), адаптивність (*resilience*) і прозорість. Це означає, що цифрові рішення повинні охоплювати не лише етап реалізації політики, а повний цикл публічного управління: від визначення проблем до аналізу ефективності політик.

Розробка стратегій регіонального розвитку без урахування інтегрованих платформ даних призводить до дублювання заходів, суперечностей у цілях та неефективного використання бюджетних ресурсів. Впровадження централізованої цифрової платформи для ведення, оновлення та зіставлення регіональних стратегій дозволить:

– забезпечити синхронізацію пріоритетів національного та місцевого рівнів;
– автоматизувати звітування за індикаторами результативності;
– зменшити адміністративне навантаження на виконавців;
– посилити аналітичну складову управлінських рішень через сценарне моделювання.

Інтеграція такого інструмента також може стати підґрунтям для формування єдиного «порталу розвитку територій», на якому будуть доступні дані про потреби, ресурси, хід реалізації проектів і можливості співфінансування з міжнародних фондів.

У світлі сучасних викликів, пов'язаних з війною та природними катастрофами, регіональна політика повинна включати механізми швидкого реагування, що базуються на цифрових даних. Цифрові алгоритми дозволяють проводити автоматичне розрахування потреб громад у допомозі, моніторити переміщення населення, координувати логістику гуманітарного забезпечення.

Оцінка ефективності реалізації регіональної політики часто зводиться до аналізу виконання формальних показників. Натомість цифрові технології дозволяють впровадити індикаторну систему моніторингу реального впливу, яка буде базуватися на: відкритих даних (*open data*), *API*-зв'язках з базами держорганів (Податкова, Пенсійний фонд, Е-соціальна громада), інтерактивній візуалізації зміни ситуації на регіональному рівні. Результатом стане перехід до цифрової моделі оцінки публічної політики, де кожен індикатор буде не лише фіксатором процесу, а тригером коригування управлінського рішення.

Окрему увагу варто приділити впровадженню елементів штучного інтелекту (*AI*) у процеси регіонального управління. Такі системи можуть використовуватись для:

– аналізу соціальних мереж для виявлення настроїв мешканців регіону;
– прогнозування потреб у соціальних послугах;
– визначення пріоритетності проектів за критеріями ефективності та інклюзивності;
– виявлення корупційних ризиків у сфері публічних фінансів.

AI також може відігравати роль у формуванні персоналізованих рішень для громад на основі індивідуальних профілів – так звані «розумні послуги».

З активізацією цифрових процесів постає питання захисту даних та інформаційної безпеки. У зв'язку з цим необхідно включити до структури цифрових механізмів реалізації регіональної політики такі компоненти:

– політику кіберзахисту критичних ІТ-ресурсів регіонів;
– стандарти збереження персональних даних;
– механізми прозорого доступу громадян до інформації про дії органів влади;
– впровадження етичних кодексів щодо використання даних та AI-рішень у регіонах.

Це дозволить сформувати цифрово-гуманістичну модель управління, де інтереси та права громадянина будуть у центрі управлінського циклу.

Цифровізація механізмів реалізації регіональної політики не повинна розглядатися у відриві від інших реформ – зокрема, реформи децентралізації, адміністративно-територіального устрою, інноваційної політики, реформи публічної служби. Її ефективність зростає за умови цифровізації бюджетного процесу (е-бюджет, блокчейн-контроль), розвитку цифрових навичок на рівні місцевих управлінців та громадян та інтеграції цифрових інструментів в систему державного стратегічного прогнозування. Цифровізація стає наскрізним принципом оновленої парадигми державної регіональної політики, яка поєднує цінності інноваційності, прозорості, гнучкості та орієнтації на людину. Це дає підстави говорити про цифрову трансформацію як не просто компонент реалізації, а системну передумову її ефективності та адаптивності у XXI столітті.

Висновки

Отже, вдосконалення механізмів державної регіональної політики є стратегічним завданням, ключовим інструментом якого виступає цифровізація, забезпечуючи проактивне регіональне врядування на основі даних, алгоритмів, інтерактивних моделей і участі громад. Водночас фрагментарність нормативно-правового поля, недостатній рівень цифрових навичок, обмежене фінансування, ризики кібербезпеки становлять певну проблему та заважають впровадженню ефективних механізмів регіонального управління на основі цифровізації. Це визначає

потребу у формуванні національної політики цифрової трансформації регіонального розвитку з чітко визначеною візією, цілями, індикаторами та інституційним супроводом.

Подальших досліджень потребують питання оцінки рівня готовності громад та адміністрацій до впровадження цифрових механізмів управління, а також вивчення впливу цифрової участі на якість регіонального стратегічного планування та управлінських рішень.

Список використаної літератури

1. Пухкий В. Принципи і механізми реалізації державної регіональної політики. *Державне управління: удосконалення та розвиток. 2024. № 11*. DOI: http://doi.org/10.32702/2307-2156.2024.11.24

2. Механізми реалізації регіональної політики: оцінка ефективності та напрями удосконалення: монографія / наук. ред. С. Л. Шульц; ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долішнього НАН України». Львів, 2018. 205 с. (Серія «Проблеми регіонального розвитку»).

3. Лелечено А. П. Комплексний механізм формування й реалізації регіональної політики сталого розвитку в Україні. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Державне управління. 2020. Т. 31(70). № 2*. С. 121–126. DOI https://doi.org/10.32838/2663-6468/2020.2/20

4. Пастух К. Механізми державної регіональної соціально-економічної політики в Україні. *Університетські наукові записки*. 2022. № 1–2(85–86). С. 177–183. DOI 10.37491/UNZ.85-86.14

5. Gudz, P., Ivanchenkov, V., Oliinyk, Y., Korepanov, G., Shkurupska, I., & Boyko, A. Innovative Social Technologies in the Region Management System. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. 9(1). P. 1562–1567. URL: https://www.ijeat.org/wpcontent/ uploads/papers/v9i1/A13521 09119.pdf

6. Возняк Г. В. Теоретико-методологічні аспекти формування моделі смарт-спеціалізації регіонів України. *Регіональна економіка*. № 2. 2021. С. 27–36. DOI: https://doi.org/10.36818/1562-0905-2021-2-3

7. Маматова Т, Чикаренко І., Бородин Є. Цифрові платформи Smart Specialisation Platform та Espon: структура та можливості для регіонів і громад ЄС. *Аспекти публічного управління*. 2022. Т. 10. № 6. С. 37–45. DOI: https://doi.org/10.15421/152242

8. Сорока М. А. Смарт-спеціалізація у стратегічному плануванні на регіональному та місцевому рівнях: витоки підходу та перспективи для України. *Аспекти публічного управління*. 2019. Т. 7. № 8. С. 20–29. DOI: 10.15421/151938

9. Ліщинська Л. Б., Добровольська Н. В. Перспективні програмні інструменти для аналізу даних у бізнесі. Вісник Хмельницького національного університету. 2022. № 1. С. 78–83. DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-78-79

10. Пономаренко І. В., Телеус А. В. Бізнес-аналітика як ефективний інструмент обробки даних. *Проблеми інноваційно-інвестиційного розвитку*. 2020. № 23. С. 64–70. DOI: https: //doi.org/10.33813/2224-1213.23.2020.7

11. Kumar D. Actual practices of citizen participation in smart cities. *Smart Cities and Regional Development (SCRD) Journal*. 2024. № 8 (Feb. 2024). Pp. 19–30. DOI: https://doi.org/10.25019/4c05yr24

12. Досвід Естонії щодо цифровізації, який будемо використовувати. Офіційний сайт міськради Білої Церкви. URL: https://bc-rada.gov.ua/node/15244

13. Європейські стандарти місцевого самоврядування та регіональна політика ЄС: навч. посіб. / М. І. Воронов, Ю. В. Градова, Л. М. Гришко [та ін.]; за заг. ред. В. О. Серьогіна. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2022. 244 с.

14. Кудин С., Федик М. Державна політика у сфері смарт-спеціалізації регіонів. *Економіка та суспільство*. 2022. № 41. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-41-16

References

1. Pukhkyi V. (2024) Pryntsypy i mekhanizmy realizatsii derzhavnoi rehionalnoi polityky. [Principles and mechanisms of implementing state regional policy]. Derzhavne upravlinnia: udoskonalennia ta rozvytok, no.11. Retrieved from: http://doi.org/10.32702/2307-2156.2024.11.24

2. Mekhanizmy realizatsii rehionalnoi polityky: otsinka efektyvnosti ta napriamy udoskonalennia: monohrafiia / nauk. red. S. L. Shults [Mechanisms for implementing regional policy: assessment of effectiveness and areas for improvement] (2018) Lviv, 2018. 205 p. (Seriia “Problemy rehionalnoho rozvytku”). [In Ukrainian].

3. Lelecheno A. P. (2020) Kompleksnyi mekhanizm formuvannia y realizatsii rehionalnoi polityky staloho rozvytku v ukraini [A comprehensive mechanism for the formation and implementation of regional sustainable development policy in Ukraine]. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: Derzhavne upravlinnia, vol. 31(70), no. 2, pp. 121–126. Retrieved from: https://doi.org/10.32838/2663-6468/2020.2/20

4. Pastukh K. (2022) Mekhanizmy derzhavnoi rehionalnoi sotsialno-ekonomichnoi polityky v Ukraini [Mechanisms of state regional socio-economic policy in Ukraine]. Universytetski naukovi zapysky, no. 1–2(85–86), pp. 177–183. Retrieved from: https: //doi.org/10.37491/UNZ.85-86.14

5. Gudz, P., Ivanchenkov, V., Oliinyk, Y., Korepanov, G., Shkurupska, I., & Boyko, A. (2019). Innovative Social Technologies in the Region Management System. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 9(1), 1562–1567. Retrieved from: https://www.ijeat.org/wpcontent/ uploads/papers/v9i1/A13521 09119.pdf

6. Vozniak H. V. (2021) Teoretyko-metodolohichni aspekty formuvannia modeli smart-spetsializatsii rehioniv Ukrainy [Theoretical and methodological aspects of forming a model of smart specialization of Ukrainian regions]. Rehionalna ekonomika, no. 2, pp. 27–36. Retrieved from: https://doi.org/10.36818/1562-0905-2021-2-3

7. Mamatova T, Chykarenko I., Borodyn Ye. (2022) Tsyfrovi platformy Smart Specialisation Platform ta Espon: struktura ta mozhlyvosti dlia rehioniv i hromad EU [Digital platforms Smart Specialisation Platform and Espon: structure and possibilities for regions and communities of the EU]. Aspekty publichnoho upravlinnia, vol. 10, no. 6, pp. 37–45. Retrieved from: https://doi.org/10.15421/152242

8. Soroka M. A. (2019) Smart-spetsializatsiia u stratehichnomu planuvanni na rehionalnomu ta mistsevomu rivniakh: vytoky pidkhodu ta perspektyvy dlia Ukrainy [SMART-Specialization in Strategic Planning at the Regional and Local Levels: Origins of the Approach and Prospects for Ukraine]. Aspekty publichnoho upravlinnia, vol. 7, no. 8, pp. 20–29. Retrieved from: https://doi.org/10.15421/151938

9. Lishchynska L. B., Dobrovolska N.V. (2022) Perspektyvni prohramni instrumenty dlia analizu danykh u biznesi [Promising software tools for data analysis in business]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, no. 1, pp. 78–83. Retrieved from: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-305-1-78-79

10. Ponomarenko I. V., Teleus A. V. (2020) Biznes-analityka yak efektyvnyi instrument obrobky danykh [Business analytics as an effective data processing tool]. Problemy innovatsiino-investytsiinoho rozvytku, no. 23, pp. 64–70. Retrieved from: https://doi.org/10.33813/2224-1213.23.2020.7

11. Kumar D. (2024) Actual practices of citizen participation in smart cities. *Smart Cities and Regional Development (SCRD) Journal*, no. 8 (Feb. 2024), pp. 19–30. Retrieved from: https://doi.org/10.25019/4c05yr24

12. Dosvid Estonii shchodo tsyfrovizatsii, yakyi budemo vykorystovuvaty [Estonia's experience in digitalization, which we will use]. 2025. Ofitsiinyi sait miskrady Biloi Tserkvy. Retrieved from: https://bc-rada.gov.ua/node/15244

13. Voronov M. I., Hradova Yu. V., Hryshko L. M. (2022) European standards of local self-government and EU regional policy; Kharkiv : KhNU im. V. N. Karazina. [In Ukrainian].

14. Kudyn S., Fedyk M. (2022) Derzhavna polityka u sferi smart-spetsializatsii rehioniv [State policy in the field of smart specialization of regions]. Ekonomika ta suspilstvo, no. 41. Retrieved from: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-41

УДК 658:330.131.7 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.45

Д. В. ЯРМУСЬ
аспірант кафедри «Менеджмент та адміністрування»
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0009-0001-4386-797X

РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ: АДАПТАЦІЯ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ

Стаття присвячена дослідженню актуальної проблеми адаптації моделей ризик-менеджменту до умов воєнного стану, спричиненого широкомасштабною агресією рф проти України. Воєнний стан радикально трансформує економічне, управлінське та безпекове середовище, створюючи безпрецедентні виклики для організацій: від фізичних загроз життю та здоров'ю персоналу до руйнування критичної інфраструктури, перебоїв у логістичних ланцюгах, фінансової нестабільності, кібернетичних атак та інформаційних загроз. У статті проведено аналіз класичних підходів до управління ризиками, визначено їхні сильні сторони та обмеження в контексті воєнного стану. На основі систематизації наукових джерел запропоновано адаптивну модель ризик-менеджменту, яка ґрунтується на чотирьох ключових блоках: динамічному виявленні ризиків, оперативній оцінці та класифікації, гнучкому реагуванні та постійному вдосконаленні. Модель інтегрує сучасні цифрові інструменти, системи раннього попередження та штучний інтелект, для моніторингу й прогнозування ризиків у реальному часі. Вона враховує специфіку воєнних умов, включаючи неекономічні ризики: психоемоційне виснаження персоналу, порушення корпоративної культури, інформаційні загрози та фізичну безпеку. Розроблена авторська класифікація ризиків охоплює операційні, стратегічні, фінансові, безпекові, соціальні та регуляторно-правові аспекти. Ця типологія слугує основою для пріоритизації управлінських рішень та оперативного реагування. Практична цінність дослідження полягає у створенні універсальної, модульної та масштабованої моделі, придатної для організацій різного масштабу – від великих корпорацій до малих підприємств з обмеженими ресурсами. Стаття наголошує на необхідності трансформації парадигми ризик-менеджменту: від статичних і формалізованих підходів до гнучких, проактивних систем, здатних забезпечити стійкість організацій в екстремальних умовах. Дослідження підкреслює важливість міждисциплінарного підходу, що інтегрує економічні, соціальні, психологічні та безпекові аспекти, для забезпечення ефективного управління ризиками в умовах воєнного стану.

Ключові слова: *ризик-менеджмент, воєнний стан, адаптивна модель, управління ризиками, невизначеність, кризове управління, безпекові ризики.*

D. V. YARMUS
Postgraduate Student of Management and Administration Department
Zaporizhzhia Polytechnic National University
ORCID: 0009-0001-4386-797X

RISK MANAGEMENT IN MARTIAL ARTS CONDITIONS: ADAPTATION OF MANAGEMENT MODELS

The article is devoted to the study of the pressing issue of adapting risk management models to the conditions of martial law caused by the large-scale aggression of the Russian Federation against Ukraine. Martial law fundamentally transforms the economic, managerial, and security environment, creating unprecedented challenges for organizations, ranging from physical threats to personnel safety to the destruction of critical infrastructure, disruptions in supply chains, financial instability, cyberattacks, and information threats. The article analyzes classical risk management approaches, identifying their strengths and limitations in the context of martial law. Based on a systematization of scholarly sources, an adaptive risk management model is proposed, built on four key components: dynamic risk identification, operational assessment and classification, flexible response, and continuous improvement. The model integrates modern digital tools, early warning systems, and artificial intelligence for real-time risk monitoring and forecasting. It accounts for the specifics of wartime conditions, including non-economic risks such as psychological exhaustion of personnel, disruption of corporate culture, information threats, and physical security concerns. The developed author's risk classification encompasses operational, strategic, financial, security, social, and regulatory-legal aspects, serving as a foundation for prioritizing managerial decisions and rapid response. The practical significance of the study lies in the creation of a universal, modular, and scalable model suitable for organizations of varying scales – from large corporations to small enterprises with limited resources. The article emphasizes the need to transform the risk management paradigm from static and formalized approaches to flexible, proactive systems capable of ensuring organizational resilience in extreme conditions. The research highlights the importance of an interdisciplinary approach that integrates economic, social, psychological, and security aspects to ensure effective risk management under martial law.

Key words: *risk management, martial law, adaptive model, risk governance, uncertainty, crisis management, security risks.*

Постановка проблеми

Воєнний стан, спричинений широкомасштабною агресією російської федерації проти України, суттєво трансформував умови функціонування усіх сфер суспільного життя, зокрема – економічної, управлінської та безпекової. В умовах високої турбулентності, невизначеності, нестабільності інституційного середовища та постійної загрози втрат ресурсів виникає гостра потреба у переосмисленні підходів до управління ризиками. Традиційні моделі ризик-менеджменту, що формувалися в умовах відносної стабільності, виявляються недостатньо ефективними у контексті багаторівневих загроз, які генерує воєнний стан.

Зростання ризиків фізичної безпеки персоналу, руйнування інфраструктури, збої у логістиці, втрати інформаційних каналів, загострення фінансових та операційних ризиків потребують адаптації існуючих систем управління до нових викликів. Водночас спостерігається недостатній рівень теоретичного й практичного опрацювання питань впровадження адаптивних моделей ризик-менеджменту у кризових ситуаціях військового характеру.

Таким чином, актуальним є наукове осмислення підходів до адаптації моделей управління ризиками в умовах воєнного стану, що забезпечить підвищення стійкості організацій до екстремальних впливів та сприятиме прийняттю ефективних управлінських рішень в умовах високої невизначеності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд наукової літератури свідчить про зростаючий інтерес дослідників до проблематики ризик-менеджменту в умовах підвищеної нестабільності та криз. У класичних підходах А. Джонса, Р. Сміта, Д. Бруна [12], К. Чапмена, С. Уорда [11], Р. Саймонса [13], а також Л. І. Донець [3], Л. І. Ріщук [5] та ін. ризик розглядається як ймовірність настання подій, що можуть негативно вплинути на досягнення цілей організації, а управління ризиками – як систематичний процес виявлення, оцінки та реагування на ці події. Разом з тим, більшість традиційних моделей ризик-менеджменту сформовані в умовах мирного часу та передбачуваного середовища, що обмежує їхню ефективність в екстремальних ситуаціях, зокрема – під час воєнного стану.

Серед сучасних українських дослідників спостерігається різноманіття підходів до вивчення ризик-менеджменту, особливо в контексті кризових ситуацій, зокрема воєнного стану. Одну групу становлять автори, які зосереджуються на загальнотеоретичних аспектах управління ризиками в економічних системах, зокрема Н. В. Гусаріна, С. О. Черкасова [1], А. Штангрет, М. Караїм, О. Караїм [10], де ризик трактується як економічна категорія, що потребує чіткої ідентифікації, кількісної оцінки та розробки системи реагування. Їхні дослідження зосереджуються переважно на фінансових, інвестиційних та виробничих ризиках.

Інша група дослідників, зокрема, Г. А. Демченко, Н. Е. Аваносова [3], Сосновська О. О., Деденко Л. В. [7], А. О. Чайкіна [8] та інші, аналізує ризик-менеджмент у контексті стратегічного управління підприємствами в умовах зовнішніх викликів. Особлива увага приділяється питанням адаптивності та гнучкості управлінських моделей, а також ролі керівництва у формуванні антикризової стратегії.

Окремий напрямок досліджень формують праці, присвячені управлінню ризиками в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій. Так, У. С. Савкіна, Г. В. Сидор, А. О. Тимків [6] та інші акцентують на потребі комплексного підходу до ризик-менеджменту, що охоплює як економічні, так і безпекові, інформаційні, логістичні та кадрові ризики. Такі підходи передбачають інтеграцію класичних методів оцінки ризиків із сучасними цифровими інструментами моніторингу та прогнозування.

Незважаючи на наявність значної кількості теоретичних і прикладних досліджень, проблема формування цілісної, адаптивної та практично орієнтованої моделі ризик-менеджменту в умовах воєнного стану залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, на сьогодні бракує уніфікованого підходу до інтеграції ризик-менеджменту у систему стратегічного управління організаціями в умовах багаторівневих загроз, які одночасно охоплюють економічну, фізичну, інформаційну та соціальну безпеку. Водночас недостатньо розкритими залишаються механізми оперативної адаптації моделей управління ризиками до динамічних змін зовнішнього середовища під впливом воєнних дій.

Отже, актуальною науково-практичною проблемою є розробка комплексного підходу до ризик-менеджменту, який враховує специфіку функціонування організацій у воєнних умовах, поєднує стратегічне бачення із тактичними інструментами реагування та ґрунтується на сучасних цифрових технологіях підтримки управлінських рішень.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування необхідності адаптації існуючих моделей ризик-менеджменту до умов воєнного стану, а також формування теоретико-методологічних засад розробки комплексного підходу до управління ризиками, здатного забезпечити стійкість і ефективність функціонування організацій в умовах високої невизначеності, багаторівневих загроз та обмежених ресурсів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Систематизація наукових підходів до ризик-менеджменту засвідчує, що більшість класичних моделей сформовані в умовах стабільного середовища, орієнтовані на попередження прогнозованих ризиків і мають обмежену дієвість у періоди турбулентності, таких як війна. Традиційно ризик-менеджмент розглядається як послідовний процес, показаний на рис. 1.

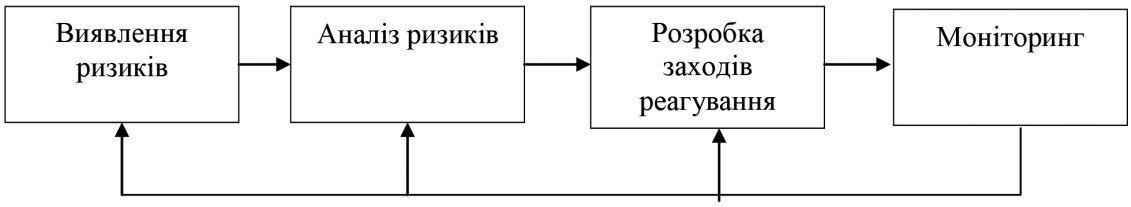


Рис. 1. Узагальнена схема процесу ризик-менеджменту за умов стабільного середовища

Джерело: сформовано на основі [3; 5; 11–13].

Цей підхід вважається універсальним, однак його ефективність значно знижується в умовах швидкоплинних, непередбачуваних та комплексних загроз, що притаманні воєнному стану.

У літературі виділяють кілька базових моделей управління ризиками:

– аналітичну;
– процесну;
– інтегровану;
– адаптивну.

Аналітична модель ризик-менеджменту орієнтована на кількісну оцінку ризиків із використанням статистичних даних, ймовірнісних методів, математичного моделювання та фінансових індикаторів. У рамках цього підходу ризик визначається як функція ймовірності та потенційного збитку, що дозволяє формалізувати процес прийняття рішень через розрахунок очікуваних втрат, побудову матриць ризиків, застосування таких методик, як *VAR (Value at Risk), Monte Carlo*, аналіз чутливості, сценарний аналіз тощо. Однак аналітична модель має низку обмежень у кризових умовах, особливо за воєнного стану: історичні дані можуть бути нерелевантними, середовище – нестабільним, а поведінка суб'єктів – ірраціональною. Тому така модель може використовуватися як допоміжна, але не як основа для прийняття стратегічних рішень у ситуаціях високої невизначеності.

Процесна модель передбачає побудову формалізованої системи ризик-менеджменту, яка функціонує за визначеними етапами: ідентифікація ризиків, їх аналіз, оцінка, визначення заходів реагування, контроль і аудит. У межах цієї моделі створюється організаційна структура управління ризиками, розподіляються відповідальності, регламентуються процедури та впроваджуються внутрішні політики. Процесна модель ефективна в умовах передбачуваного середовища, де є можливість чіткого планування. Проте в умовах воєнного стану, коли ризики можуть виникати спонтанно і вимагати миттєвої реакції, жорсткі процеси можуть стати гальмом – без додаткової гнучкості та адаптивності система ризик-менеджменту втрачає актуальність.

Інтегрована модель базується на принципі включення управління ризиками в усі функціональні сфери організації – стратегічне планування, фінанси, маркетинг, виробництво, *HR, IT*, логістику тощо. Такий підхід забезпечує загальну координацію та дозволяє уникати дублювання або протиріч у діях окремих підрозділів. У рамках інтегрованої моделі створюються єдині цифрові платформи управління ризиками (*ERM*-системи), застосовується ризик-орієнтоване мислення на всіх рівнях менеджменту. Попри ефективність, така модель вимагає значних інвестицій у розбудову IT-інфраструктури, підготовку персоналу, зміни корпоративної культури. В умовах воєнного стану її реалізація можлива лише на підприємствах із високим рівнем управлінської зрілості, тому для більшості українських організацій вона потребує адаптації або поетапного впровадження.

Адаптивна модель, на відміну від попередніх, ґрунтується не на стабільності процесів чи історичних даних, а на здатності організації змінювати управлінські рішення у відповідь на динамічне середовище. Ця модель акцентує на гнучкості, проактивності, багатоваріантності сценаріїв дій і швидкому зворотному зв'язку. Вона орієнтується на:

– постійне оновлення переліку ризиків та їхньої критичності;
– оперативне переключення між альтернативними шляхами виконання операцій;
– створення резервних ресурсів і мобільних команд;
– цифрову підтримку рішень (швидкий обмін інформацією, онлайн-моніторинг, інтеграція з системами безпеки).

Адаптивна модель не замінює попередні повністю, а скоріше поєднує їхні елементи в єдину систему, доповнену здатністю до трансформації. Вона є найбільш релевантною в умовах воєнного стану, адже дозволяє реагувати на нетипові події, гнучко перебудовувати операційні процеси, мінімізувати вплив невизначеності. Водночас її недоліком є потреба у чітко визначених організаційних і технологічних механізмах реалізації: структурних одиницях, які відповідальні за адаптацію, цифрових інструментах, навченому персоналі, системі внутрішньої комунікації тощо. Таким чином, адаптивна модель виглядає як найбільш перспективний напрям у сучасному ризик-менеджменті, особливо для організацій, що функціонують в умовах воєнного стану. Проте вона потребує подальшої деталізації на рівні методів, процедур, інструментів та умов впровадження в конкретних галузях і типах підприємств.

В таблиці 1 показано порівняння описаних моделей ризик-менеджменту за низкою релевантних критеріїв, зокрема – з урахуванням умов воєнного стану.

Таблиця 1

Порівняння базових моделей ризик-менеджменту

Критерій / Модель	**Аналітична**	**Процесна**	**Інтегрована**	**Адаптивна**
Основна ідея	Кількісна оцінка ризиків на основі статистики та моделей	Побудова формалізованих процесів управління ризиками	Включення управління ризиками в усі функціональні сфери організації	Гнучка система управління ризиками, що адаптується до змін зовнішнього середовища
Ключові інструменти	VAR, Monte Carlo, аналіз чутливості, сценарний аналіз	Політики, процедури, матриці відповідальності, регламентовані етапи управління	ERM-системи, інтеграція в корпоративну культуру, стратегічне планування	Онлайн-моніторинг, сценарне планування, цифрові системи, мобільні команди
Сильні сторони	Висока точність у стабільних умовах, підходить для фінансових рішень	Чіткість, передбачуваність, відповідність стандартам	Координація на всіх рівнях управління, зниження фрагментації процесів	Гнучкість, швидкість реакції, здатність до змін, релевантність в умовах високої невизначеності
Обмеження	Низька ефективність у турбулентному середовищі, залежність від історичних даних	Жорсткість процедур, недостатня адаптивність до нових загроз	Складність впровадження, потреба в ресурсах, управлінська зрілість	Потреба в чітких механізмах реалізації, високі вимоги до організаційної та технологічної гнучкості
Рівень застосування	Найчастіше – у фінансах, банках, інвестиціях	У великих компаніях, державних структурах	У корпораціях із розвиненою IT-інфраструктурою, транснаціональних компаніях	У кризовому менеджменті, стартапах, гуманітарних та логістичних структурах під час війни
Актуальність у воєнний час	Низька	Помірна	Висока за наявності відповідних ресурсів	Найвища – забезпечує оперативне реагування, адаптацію, виживання та стабільність у нестабільних умовах

Джерело: сформовано на основі [11–13].

Порівняльний аналіз підходів, запропонованих у наукових працях К. Чапмена і С. Уорда (управління невизначеністю), Р. Саймонса (системи управлінського контролю), а також українських авторів (А. Штангрет, Н. Гусаріна, У. Савкіна та ін.), дозволяє виділити спільні та відмінні риси. У більшості зарубіжних моделей акцент зроблено на системність процесів, оцінку ймовірності настання подій, управління наслідками. Водночас українські автори, особливо після 2022 року, наголошують на необхідності побудови ризик-менеджменту як гнучкої, адаптивної системи, що враховує як внутрішні ресурси підприємства, так і вплив зовнішніх (неконтрольованих) факторів – зокрема, збоїв у логістиці, знищення виробничих потужностей, втрати людського капіталу, кіберзагроз, блокування постачань тощо.

Однією з ключових проблем у впровадженні ефективного ризик-менеджменту в умовах воєнного стану є відсутність або низький рівень інституціоналізації процедур управління ризиками. Багато підприємств, особливо в державному секторі, не мають формалізованих механізмів оцінки ризиків або не оновлюють їх відповідно до нових викликів. Це обумовлює потребу у створенні універсальної адаптивної моделі, яка могла б застосовуватися в організаціях з різним рівнем підготовленості, та враховувала б галузеву специфіку, ресурсні обмеження, рівень діджиталізації та інші чинники.

На основі узагальнення теоретичних джерел та аналізу практичних кейсів можна окреслити елементи адаптивної моделі ризик-менеджменту для умов воєнного стану. Запропонована модель складається з чотирьох взаємопов'язаних блоків:

1. Динамічне виявлення ризиків – постійний моніторинг внутрішніх і зовнішніх факторів за допомогою цифрових інструментів, включно з використанням *open-source intelligence* (*OSINT*), *Big Data*, систем раннього попередження (EWS) та ін.
2. Оперативна оцінка та класифікація ризиків – розподіл ризиків за рівнем критичності (*low–medium–high*) із застосуванням ймовірнісних, сценарних та експертних методів.
3. Гнучке реагування – формування адаптивних сценаріїв дій із залученням крос-функціональних команд, резервних ресурсів, а також можливістю переключення на альтернативні канали діяльності.
4. Зворотній зв'язок і постійне вдосконалення – оцінка ефективності прийнятих рішень, оновлення бази ризиків та сценаріїв, інтеграція *lessons learned* у наступні управлінські цикли.

Ключовою перевагою цієї моделі є її модульність і масштабованість, – вона може бути впроваджена як у великих підприємствах із розвиненою структурою управління, так і в середніх чи малих організаціях, що лише формують власні підходи до управління ризиками. Крім того, модель враховує рівень цифрової трансформації: за наявності відповідних інструментів (*ERP, CRM, BI*-аналітика) – процес може бути автоматизований; за їхньої відсутності – організований на базі стандартних управлінських процедур та ручного аналізу.

Орієнтуючись на специфіку функціонування підприємств в умовах воєнного стану та адаптивну модель ризик-менеджменту, доцільно виокремити класифікацію ризиків, які охоплюють як традиційні бізнес-ризики, так і специфічні, зумовлені військовими діями, соціальною нестабільністю та інформаційними викликами. Нижче подано авторську класифікацію ризиків, релевантну для застосування адаптивної моделі управління:

1. Операційні ризики:
– ризики переривання ланцюгів постачання (блокада транспортних маршрутів, знищення складів, логістичні обмеження);
– ризики недоступності ресурсів (відсутність сировини, пального, комплектуючих);
– ризики порушення виробничих процесів (руйнування інфраструктури, перебої з електро- та водопостачанням);
– техногенні ризики (аварії через порушення безпечної експлуатації в стресових умовах).
2. Стратегічні ризики:
– втрати ринків збуту (зміна географії клієнтів, скорочення платоспроможного попиту);
– ризик недоцільності довгострокових інвестицій (невизначеність тривалості воєнного стану);
– політичні ризики (рішення уряду, санкції, воєнна мобілізація, екстериторіальні обмеження);
– ризик репутаційних втрат (через неадекватну реакцію на воєнну ситуацію, співпрацю з рф, невиконання соціальних зобов'язань).
3. Фінансові ризики:
– коливання валютних курсів (різке знецінення національної валюти, нестабільність банківської системи);
– ризики втрати активів (фізична втрата майна, замороження рахунків, крадіжки);
– зниження платоспроможності контрагентів (високий рівень неплатежів, банкрутства);
– обмеження доступу до фінансування (відмова інвесторів, зниження кредитних ліній).
4. Ризики безпеки:
– фізична загроза персоналу (обстріли, мобілізація, евакуація);
– кіберзагрози (кібератаки, витік даних, блокування);
– диверсійні та терористичні дії (спроби пошкодити стратегічні об'єкти підприємства);
– порушення інформаційної безпеки (дискредитаційні кампанії, фейкові новини, соціальний інжиніринг).
5. Соціальні та гуманітарні ризики:
– психоемоційне виснаження персоналу (стрес, вигоряння, тривожність);
– кадрові втрати (вимушений виїзд, мобілізація, небажання працювати в зоні ризику);
– ризик зниження залученості персоналу (втрата мотивації, конфлікти, депресія);
– руйнування внутрішніх комунікацій (перервані зв'язки між відділами, недовіра до керівництва).
6. Регуляторно-правові ризики:
– раптові зміни законодавства (воєнні укази, обмеження на переміщення товарів, валютний контроль);
– проблеми з правовим захистом власності (втрата реєстраційних документів, визнання форс-мажору);
– ризик націоналізації або мобілізації майна.

Ця типологія є основою для впровадження адаптивної моделі ризик-менеджменту, оскільки дозволяє: динамічно виявляти широкий спектр ризиків у реальному часі та розставляти пріоритети за критичністю та впливом.

Окрему увагу в контексті воєнного стану слід приділити ризикам неекономічного характеру:
– фізичній безпеці персоналу;
– інформаційним загрозам;
– руйнації корпоративної культури;
– психологічному стану працівників.

Більшість із зазначених ризиків виявляються критичними для стійкості організацій, але у більшості моделей ризик-менеджменту залишаються поза увагою. Таким чином, доцільним є розширення методологічного підходу до управління ризиками шляхом інтеграції гуманітарних, психологічних та соціологічних складових.

Ще одним важливим напрямом є впровадження цифрових рішень. Досвід українських компаній, що успішно адаптувалися до нових умов, свідчить про ефективність застосування програмного забезпечення для відстеження ризиків у реальному часі. Йдеться, зокрема, про використання геоінформаційних систем для оцінки логістичних ризиків, хмарних платформ для збереження резервних копій даних, застосування AI для аналізу відкритих джерел інформації тощо.

Варто також зазначити важливість міжрівневої координації в процесі ризик-менеджменту. В умовах воєнного стану багато управлінських рішень мають прийматися синхронно на різних рівнях: стратегічному (топ-менеджмент), тактичному (функціональні підрозділи) та оперативному (на місцях). Тому модель ризик-менеджменту має містити елементи внутрішньої комунікації, розподілу відповідальності, делегування повноважень і використання стандартизованих протоколів реагування.

На основі проведеного дослідження можна зробити висновок, що адаптація моделей управління ризиками до умов воєнного стану повинна бути не просто оновленням існуючих підходів, а повноцінною трансформацією парадигми управління: від статичних моделей до гнучких, від формальних процедур до практичних рішень, від ізольованих заходів до комплексної системи антикризового реагування. Запропонована адаптивна модель є лише одним із можливих варіантів вирішення цієї проблеми, проте вона може слугувати основою для подальших досліджень, а також практичного впровадження в українських реаліях.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує, що воєнний стан, спричинений широкомасштабною агресією проти України, створює унікальні виклики для систем ризик-менеджменту, які потребують кардинального переосмислення традиційних підходів. Традиційні моделі управління ризиками, орієнтовані на стабільне середовище, виявляються недостатньо ефективними в умовах високої невизначеності, багаторівневих загроз та обмежених ресурсів. Запропонована адаптивна модель ризик-менеджменту, що базується на динамічному виявленні ризиків, оперативній оцінці, гнучкому реагуванні та постійному вдосконаленні, є найбільш релевантною для умов воєнного стану. Її ключовими перевагами є модульність, масштабованість та здатність інтегрувати цифрові інструменти, системи раннього попередження та AI, для моніторингу й прогнозування ризиків у реальному часі. Практична цінність адаптивної моделі полягає в її універсальності: вона може бути застосована як у великих організаціях із розвиненою управлінською інфраструктурою, так і в малих підприємствах із обмеженими ресурсами. Водночас для її ефективного впровадження необхідні чітко визначені організаційні механізми, включаючи крос-функціональні команди, стандартизовані протоколи реагування, розподіл відповідальності та інтеграцію цифрових рішень. Важливим є також посилення міжрівневої координації, що забезпечує синхронізацію управлінських рішень на стратегічному, тактичному та оперативному рівнях.

Таким чином, адаптація моделей ризик-менеджменту до умов воєнного стану вимагає переходу від статичних і формалізованих підходів до гнучких, проактивних і комплексних систем, які поєднують стратегічне бачення з тактичними інструментами. Запропонована модель може стати основою для подальших наукових розробок і практичного впровадження, сприяючи підвищенню стійкості організацій та їхньої здатності ефективно функціонувати в умовах екстремальної невизначеності. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку конкретних методик і інструментів реалізації адаптивної моделі з урахуванням галузевої специфіки та рівня цифрової трансформації організацій.

Список використаної літератури

1. Гусаріна Н. В., Черкасова С. О. Ризик менеджмент надзвичайних ситуацій. Оглядова стаття. Economic journal Odessa polytechnic university. 2021. № 3(17). С. 63–68. DOI: 10.15276/EJ.03.2021.9

2. Демченко Г. В., Аванесова Н. Е. Інтеграція в загальну ризик-менеджменту стратегію розвитку підприємства. Проблеми і перспективи розвитку підприємництва: Збірник наукових праць Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Харків : ХНАДУ, 2024. № 2(33). С. 38–49. DOI: https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2024.33.38

3. Донець Л. І. Економічні ризики та методи їх вимірювання : навч. посіб. К. : Центр навчальної літератури, 2006. 312 с.

4. Мостенська Т., Білан Ю. Ризик-менеджмент як чинник забезпечення економічної безпеки підприємств. Актуальні проблеми економіки. 2015. № 8(170). С. 193–203. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u282/2015_mostenska_risk.pdf

5. Ріщук Л. І. Методичний підхід до оцінки внутрішніх ризиків підприємства. Глобальні та національні проблеми економіки. 2017. Вип. 16. С. 442–446. URL: http://global-national.in.ua/archive/16-2017/90.pdf.

6. Савкіна У. С., Сидор Г. В., Тимків А. О. Управління ризиками зовнішньоекономічної діяльності підприємств в умовах війни. Науковий вісник ІФНТУНГ. Серія: Економіка та управління в нафтовій і газовій промисловості. 2022. № 2(26). С. 80–88. DOI: 10.31471/2409-0948-2022-2(26)-79-88

7. Сосновська О. О., Деденко Л. В. Ризик-менеджмент як інструмент забезпечення стійкого функціонування підприємства в умовах невизначеності. Європейський науковий журнал економічних та фінансових інновацій. 2019. Вип. 1. С. 70–79. DOI: http://doi.org/10.32750/2019-0106

8. Чайкіна А. Особливості інтеграції ризик-менеджменту в систему управління підприємством. *Економіка та суспільство*. 2022. № 39. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-39-5

9. Штангрет А., Караїм М., Караїм, О. Безпекові аспекти застосування ризик-орієнтованого управління підприємством в умовах воєнного стану. *Економіка та суспільство*. 2024. № 60. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-60-8

10. Chapman C., Ward S. (2011). How to Manage Project Opportunity and Risk: Why Uncertainty Management can be a Much Better Approach than Risk Management. 3rd ed. Chichester: Wiley.

11. Chapman C. B., Ward S. C. (2003). Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights. 2nd ed. Chichester: Wiley.

12. Jones A., Smith P., Brown D. (2022) Corporate culture and risk management integration. Strategic Management Journal. Vol. 43. Issue 5. Pp. 987–1003.

13. Simons R. (1995) *Levers of Control: How Managers Use Innovative Control Systems to Drive Strategic Renewal*. Boston: Harvard Business School Press.

References

1. Husarina N. V., Cherkasova S. O. (2021) Ryzyk menedzhment nadzvychainykh sytuatsii. Ohliadova stattia. [Risk management of emergency situations. Review article]. *Economic journal Odessa polytechnic university*, vol. 3(17), pp. 63–68. DOI: 10.15276/EJ.03.2021.9 [in Ukrainian].

2. Demchenko H. V., Avanesova N. E. (2024) Intehratsiia v zahalnu ryzyk-menedzhmentu stratehiiu rozvytku pidpryiemstva. Problemy i perspektyvy rozvytku pidpryiemnytstva [Integration into the overall risk management strategy of the enterprise]. Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu. Kharkiv: KhNADU, vol. 2(33), pp. 38–49. DOI: https://doi.org/10.30977/PPB.2226-8820.2024.33.38 [In Ukrainian].

3. Donets L. I. (2006) Ekonomichni ryzyky ta metody yikh vymiriuvannia : navch. posib. K. : Tsentr navchalnoi literatury, 312 p. [In Ukrainian].

4. Mostenska T., Bilan Yu. (2015) Ryzyk-menedzhment yak chynnyk zabezpechennia ekonomichnoi bezpeky pidpryiemstv [Risk management as a factor in ensuring the economic security of enterprises]. Aktualni problemy ekonomiky, vol. 8 (170), pp.. 193–203. Retrieved from: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u282/2015_mostenska_risk.pdf [in Ukrainian].

5. Rishchuk L. I. (2017) Metodychnyi pidkhid do otsinky vnutrishnikh ryzykiv pidpryiemstva [Methodical approach to assessing internal risks of an enterprise]. Hlobalni ta natsionalni problemy ekonomiky, vol. 16, pp. 442–446. Retrieved from: http://global-national.in.ua/archive/16-2017/90.pdf [in Ukrainian].

6. Savkina U. S., Sydor H. V., Tymkiv A. O. (2022) Upravlinnia ryzykamy zovnishnoekonomichnoi diialnosti pidpryiemstv v umovakh viiny [Risk management of foreign economic activity of enterprises in wartime]. Naukovyi visnyk IFNTUNH. Seriia: Ekonomika ta upravlinnia v naftovii i hazovii promyslovosti, vol. 2(26), pp. 80–88. DOI: 10.31471/2409-0948-2022-2(26)-79-88. [in Ukrainian].

7. Sosnovska O. O., Dedenko L. V. (2019) Ryzyk-menedzhment yak instrument zabezpechennia stiikoho funktsionuvannia pidpryiemstva v umovakh nevyznachenosti [Risk management as a tool for ensuring the sustainable functioning of an enterprise in conditions of uncertainty]. Yevropeiskyi naukovyi zhurnal ekonomichnykh ta finansovykh innovatsii, vol. 1, pp. 70–79. DOI: http://doi.org/10.32750/2019-0106.[in Ukrainian].

8. Chaikina A. (2022). Osoblyvosti intehratsii ryzyk-menedzhmentu v systemu upravlinnia pidpryiemstvom [Features of integrating risk management into the enterprise management system]. Ekonomika ta suspilstvo, vol. 39. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-39-5 [in Ukrainian].

9. Shtanhret A., Karaim M., Karaim, O. (2024) Bezpekovi aspekty zastosuvannia ryzyk-oriientovanoho upravlinnia pidpryiemstvom v umovakh voiennoho stanu [Specific aspects of the application of risk-based enterprise management in martial law conditions]. Ekonomika ta suspilstvo, vol. 60. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-60-8 [in Ukrainian].

10. Chapman, C., & Ward, S. (2011). *How to Manage Project Opportunity and Risk: Why Uncertainty Management can be a Much Better Approach than Risk Management*, 3rd ed. Chichester: Wiley [in English].

11. Chapman, C. B., & Ward, S. C. (2003). *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights*, 2nd ed. Chichester : Wiley [in English].

12. Jones, A., Smith, P., Brown, D. (2022) Corporate culture and risk management integration. Strategic Management Journal, vol. 43, Issue 5, pp. 987–1003. [in English].

13. Simons, R. (1995) Levers of Control: How Managers Use Innovative Control Systems to Drive Strategic Renewal. Boston: Harvard Business School Press. [in English].

ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

УДК 667.021.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.46

В. В. БАЗИЧЕНКО
аспірантка кафедри державного управління
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0004-1370-6093

ЗАГРОЗИ ТА ВИКЛИКИ ДЕРЖАВНОМУ УПРАВЛІННЮ В СФЕРІ НАЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ ТА РЕГІОНАЛЬНИХ ВИКЛИКІВ

У статті розглянуто систему національної безпеки на сучасному рівні. Визначено виклики та загрози, які постають перед суспільством, розуміння сутності сучасних загроз та викликів сприяє методологічному обґрунтуванню завдань, забезпеченню та управлінню в сфері національної безпеки. Питання забезпечення та управління національною безпекою особливо актуалізувалися в умовах глобальних зміни, які виникли в епоху глобалізації. Загрози та виклики державному управлінню в сфері національної безпеки швидкими темпами почали набувати універсального характеру. Нерозв'язані глобальні проблеми сучасності також наповнюють новим змістом поняття загроз національній безпеці. Виокремлено ключові виклики для України, серед яких, насамперед, є трансформація побудови світової системи безпеки; зниження рівня економічного розвитку України, зменшення обсягів ВВП, а також втрата позицій країни у міжнародному конкурентному середовищі; швидкий розвиток інноваційних та інформаційних технологій потребує посиленого фінансування державою науково-дослідних та дослідно-конструкторських розробок, прийняття державних програм підтримки суб'єктів господарювання; поглиблення демографічної кризи; техногенне перенавантаження для довкілля. Варто відзначити, що в умовах сьогодення наявність реального виклику – це ймовірність переростання реального виклику у загрозу. На сьогодні позиція Україна дуже вразлива, тому варто зробити якісний і довгостроковий прогноз трансформації не тільки політичної (державного управління), економіко-соціальної, але і безпекового середовища країни, що слугуватиме базисом для розробки довгострокової концепції розвитку держави. Наразі нагальними залишаються внутрішні виклики та загрози національній безпеці у економічній, соціальній, енергетичній, фінансовій, інформаційній, екологічній, продовольчій та інших сферах життєдіяльності держави, але і не менший вплив на стан та рівень національної безпеки справляють зовнішні загрози не тільки у воєнній, але і у міжнародній сферах.

У ході нашого дослідження, було зосереджено увагу на основних ризиках та загрозах національній безпеці та встановлено, що в сучасних умовах ослаблення державного нагляду, а також недостатня ефективність не тільки правових, але і економічних механізмів упередження, запобігання та нейтралізація загроз національній безпеці збільшують ризик у всіх сферах життєдіяльності України.

Ключові слова: *національна безпека, держава, загроза, виклик, система міжнародних відносин, криза, нові виклики та загрози.*

V. V. BAZYCHENKO
Postgraduate Student at the Department of Public Administration
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0004-1370-6093

THREATS AND CHALLENGES TO PUBLIC ADMINISTRATION IN THE FIELD OF NATIONAL SECURITY OF UKRAINE IN THE CONTEXT OF GLOBAL AND REGIONAL CHALLENGES

The article examines the national security system at the current level. The challenges and threats facing society are identified, and understanding the essence of modern threats and challenges contributes to the methodological substantiation of tasks, provision and management in the field of national security. The issues of ensuring and managing national security have become particularly relevant in the context of global changes that have emerged in the era of globalisation. Threats and challenges to public administration in the field of national security have rapidly become universal in nature. The unresolved global problems of our time also fill the concept of threats to national security with new content. The author identifies key challenges for Ukraine, including, first of all, the transformation of the world security system; decline in the level of economic development of Ukraine, reduction of GDP, and loss of the country's position in the international competitive environment; rapid development of innovative technologies requires increased state funding of research and development, adoption of state programmes to support business entities; deepening of the demographic crisis; and man-made overload for the environment. It is worth noting that in today's environment,

the existence of a real challenge means the likelihood of a real challenge turning into a threat. Today, Ukraine's position is very vulnerable, so it is worth making a qualitative and long-term forecast of the transformation of not only the political (public administration), economic and social, but also the security environment of the country, which will serve as a basis for developing a long-term concept of the state's development. Internal challenges and threats to national security in the economic, social, energy, financial, information, environmental, food and other spheres of the state's life remain urgent, but external threats not only in the military but also in the international sphere have no less impact on the state and level of national security.

Our study focused on the main risks and threats to national security and found that in the current environment of weakened state oversight, insufficient effectiveness of not only legal but also economic mechanisms for preventing, mitigating and neutralising threats to national security increase the risk in all spheres of Ukraine's life.

Key words: *national security, state, threat, challenge, system of international relations, crisis, new challenges and threats.*

Постановка проблеми

У сучасному світі поняття особа – суспільство – держава є невіддільними. А безпека особи, відповідно і суспільства та держави є чи ненайбільшим пріоритетом, адже сильна держава – незалежна, суверенна держава. Станом національної безпеки визначається і роль та місце держави на міжнародному рівні. Як зауважує О. В. Моргалюк, теперішні зміни в структурі суспільства і держави зумовлені процесами глобалізації, посиленням єдності світу та одночасним поглибленням його національної різноманітності. Національна ж безпека є категорією, яка відображає ступінь захищеності прав, свобод, інтересів особи, суспільства та держави від зовнішніх і внутрішніх загроз, ступінь відсутності загроз правам і свободам громадян, інтересам та цінностям суспільства та держави [3].

Як показує практика та теперішні події у світі, сфера забезпечення національної безпеки сучасної держави перебуває у змінному стані, тобто характеризується наявністю ряду неочікуваних та постійних змін, практично охоплює усі сфери життєдіяльності суспільства та функціонування держави. І саме тому питання забезпечення національної безпеки є найбільшою та найважливішою складовою політики будь-якої держави світу.

Надзвичайно актуальним це питання було і є для України. Оскільки останні 34 роки наша держава ставала на ноги, формувалася, а сьогодні протистоїть реальній загрозі своїй національній безпеці з боку ворога, що зазіхає на суверенітет і територіальну цілісність України. Російська військова агресія проти України, анексія Криму та цілеспрямована окупація окремих районів східної України змінили наше ставлення до проблеми національної безпеки держави. Ми побачили, що сьогодні як ніколи, національна безпека України, в тому числі державне управління у цій сфері, потребує її забезпечення, що спрямоване на реальний захист і реалізацію національних цінностей та інтересів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Національна безпека як одне з фундаментальних понять політичної науки та головний чинник суспільного розвитку, стає все більше обговорюваним і досліджуваним, особливо в умовах сучасної глобалізації та встановлення нового світового порядку. На сьогодні, коли міжнародна система забезпечення національної безпеки стала перед новими викликами і раніше невідомими загрозами, теоретичний аналіз основних положень національної безпеки необхідний як для виправлення попередніх помилок, так і для вдосконалення форм та методів не тільки внутрішньої, але і зовнішньої державної політики, а також оптимізації діяльності органів державного управління.

Поняття національної безпеки як об'єкта державного управління, порядок здійснення державного управління у сфері національної безпеки, досліджували: І. Білас, В. Галєєв, О. Глазгов, В. Горбулін, І. Доронін, А. Качинський, Є. Кобко, В. Ліпкан, О. Мельник, А. Пашков, С. Пономарьов, О. Прокопенко, О. Пучков, М. Свердан, Г. Ситник, О. Суходоля та інші науковці.

Формування мети дослідження

Метою статті є узагальнення факторів, що впливають на державне управління у сфері забезпечення національної безпеки, з'ясування їх основних характеристик, адже за останні роки відбулося ряд змін, що зумовлені не тільки регіональними, але і світовими чинниками, що безпосередньо впливають на безпекову ситуацію в Україні. Також, досліджено процес трансформації загроз і викликів національній безпеці в умовах глобальних викликів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Трансформаційна перебудова світогосподарського порядку та динамічність геополітичних змін, які на сучасному етапі інтенсифікувалися під впливом міжнародної нестабільності та виникнення збройних військових конфліктів у різних країнах світу, обумовлюють розбалансування усталених механізмів управління світовою економікою та спричинюють виникнення вагомих ризиків і загроз національній безпеці України. Очевидно, що повномасштабне вторгнення російської федерації на територію незалежної та суверенної України стало каталізатором трансформаційних змін світового порядку та новим викликом для глобальних і регіональних інституційних структур. Варто визнати, що спроби вибудувати глобальну систему безпеки з урахуванням інтересів усіх країн світу не увінчалися успіхом, а спроможність політичних еліт вчасно протидіяти існуючим та потенційним загрозам глобальній національній безпеці є надзвичайно низькою. Зазначені тенденції доводять вагомість визначеної проблематики

дослідження викликів і загроз національній безпеці України в контексті посилення дестабілізуючого впливу чинників війни, адже, в умовах сьогодення Україна опинилася у центрі формування нового світового порядку.

Таким чином, виходячи з визначення національної безпеки, яке подане у Законі України «Про національну безпеку України» [4], її сутність передбачає формування комплексу спеціальних заходів, спрямованих на забезпечення захищеності державного суверенітету, конституційного й демократичного ладу, територіальної цілісності та інтересів держави від реальних і потенційних загроз. Забезпечення національної безпеки України під впливом дестабілізуючих чинників воєнного характеру істотно залежить від перебігу війни та від наслідків, які вона спричинює, а також визначається позицією західної антиросійської коаліції щодо надання військової, технічної та фінансової підтримки, адже крім глобальних загроз національній безпеці в Україні постійно загострюються й внутрішні виклики, зокрема, вагомий вплив на забезпечення національної безпеки має політична й соціально-економічна кризи, неефективність публічної політики та здійснення управлінських заходів, фрагментарність реформ й посилення корупційних ризиків із гучними корупційними скандалами, зокрема й в секторі безпеки і оборони країни.

Зниження ефективності органів захисту безпеки держави (всіх видів). Як частина системи державного управління, органи державної безпеки і правопорядку відчувають на собі дію загальних для всієї системи процесів, причому в більш вираженому, концентрованому вигляді. В умовах падіння ефективності і прогресуючої самодискредитації державного апарату, відбувається перекручування мотивації працівників органів безпеки, що призводить до ослаблення професійного відбору, і, відповідно, посилює тенденцію зниження професійної компетентності. У цих умовах об'єктивно необхідна в профілактичному плані каральна функція даних органів трансформувалася в ефективний корупційний інструмент; міжвідомчі «війни» більше загострилися і набули характеру боротьби за доступ до нефункціональних важелів управління в політичних і економічних інтересах внутрішньоелітних груп впливу.

Варто виділити ризики та загрози кризи державного управління, які породжуються незавершеним процесом пристосування політичних інститутів до потреб і проблем економічного і соціального розвитку. Серед основних ризиків та загроз є наступні, а саме: неефективність державного апарату. Безпосереднім зовнішнім виразом цієї неефективності є невиконання державних програм, неефективне використання бюджетних ресурсів, продовольча інфляція, зростаюча загроза підвищення тарифів, зниження рівня життя значної частини населення. Все вищезазначене має місце при об'єктивно сприятливих умовах і визнано високою міжнародною кон'юнктурою для товарів казахстанського експорту, насамперед, вуглеводнів. Дані процеси розгортаються на тлі збереження вузькості національного ринку, що перешкоджає створенню високотехнологічних великих вітчизняних виробництв. Як наслідок, неконкурентоспроможна собівартість продукції при високій транспортній складовій у витратах виробництва, монополізм і відсутність реальної конкуренції, тиск зарубіжної продукції, а також корумпованість державного апарату породжує «корупційний податок на економіку». Таким чином, є додатковим тягарем на величину цін, кредитів, платежів, корупція в економічному сенсі перешкоджає становленню та розвитку ринкових інститутів в їх повному розумінні, оскільки підриває конкурентоспроможність агентів ринку позаекономічними засобами. Найбільш корумпованими є правоохоронні органи, суди, митниця, і інші органи, а також зниження рівня компетентності та політичної лояльності державних службовців. Основною формою прояву виступає не тільки пережита криза, але й не дуже високий рівень компетентностей у використанні управлінських можливостей та повноважень. Реальними причинами цього можуть бути: а) боротьба кланів у вищому керівництві; б) недостатня ефективність кадрової політики на рівні як керівників, так і виконавців; в) відсутність або недостатність матеріальних і кар'єрних стимулів для державних службовців на всіх рівнях влади; г) таємність процесу прийняття кадрових та управлінських рішень для альтернативних варіантів діяння.

Варто зазначити, що реальні загрози національній безпеці країни перешкоджають просуванню реформ, провокують зростання соціального невдоволення політикою держави.

До внутрішніх загроз економічній безпеці України слід віднести: галузі, високі витрати виробництва, низьку якість продукції, і, як наслідок, низьку конкурентоспроможність національної економіки; втрату значної частини науково-технічного потенціалу, позицій на важливі напрямки науково-технічного прогресу; деформовану структуру виробництва; зруйнування системи відтворення виробничого потенціалу, а також неефективність державного управління соціально-економічними процесами та ін.

До головних зовнішніх загроз належать: імпортна залежність України з багатьох видів продукції, включаючи стратегічні товари, енергоносії, комплектуючі вироби для машинобудування, продовольчі товари; нераціональна структура експорту; перебування ще в зародковому стані фінансової, організаційної та інформаційної інфраструктури підтримки конкурентоспроможності всього українського експорту; некерований відтік за кордон інтелектуальних і трудових ресурсів; недостатній експортний та валютний контроль і недосконаліть митної політики; слабка розвиненість транспортної інфраструктури зовнішньоекономічних стосунків [5]

В умовах фінансово-економічної кризи набула тотального характеру тіньова економіка України. Вона є найгострішою проблемою сучасності та основою для криміналізації, корупції, хабарництва в економічній, політичній, а також і соціальній сферах. Поширення тіньової економіки, зумовлює зокрема макроекономічні диспропорції,

структурні деформації суспільно-економічного розвитку, що призводить до досить різкого зниження ефективності державної політики.

Серед загроз в економічній сфері доцільно виділити також наступні: неефективність економічних інститутів управління, падіння бюджетної дисципліни; підвищення цін і тарифів.

Кризові явища в сільському господарстві розпадаються на кілька груп, кожна з яких окремо або в сукупності може викликати негативний ефект в суспільстві, з відповідними політичними наслідками для режиму, а саме: породжені процесами природної деградації, до яких можна віднести стан земельного фонду країни, в якому накопичуються незворотні (на нинішньому рівні господарювання) зміни: засолення грунтів в результаті монокультури бавовни і рису, нестачі вологи, стану зрошувальних і дренажних систем, агротехніки; виснаження орного шару в районах ризикованого землеробства; стан соціальної сфери, середовища проживання, серед яких виділяються наступні: різке погіршення за останні роки загальних умов проживання, занепад соціальної сфери, що супроводжується депопуляцією цілих районів. Характеризуються низькою щільністю об'єктів соціально-культурної сфери (освіта, охорона здоров'я, культура, дитячі дошкільні установи) і, навпаки, підвищеним відсотком живуть за межею бідності, самозайнятих, які отримують адресну соціальну допомогу.

Таким чином, варто підкреслити, що негативні тенденції в соціальній сфері та накопичені соціальні проблеми створюють загрози національній безпеці та подальшому розвитку суспільства, які можуть стати причинами порушення рівноваги та стабільності. Загрози соціальній безпеці охоплюють дії, спрямовані проти утвердження України як соціальної держави, солідарного суспільства, проти національних соціальних інтересів, які відображають потреби українського народу у добробуті, гідних умов життєдіяльності. Особливо небезпечними є загрози, які виявляються через: неефективність державної політики щодо підвищення трудових доходів громадян, подолання бідності та збалансування продуктивної зайнятості працездатного населення; зростаюча наявність безробіття; невідповідність програм реформування економіки країни і результатів їх здійснення визначеним соціальним пріоритетам; низький рівень життя та соціальної захищеності широких верств населення; гостра демографічна криза; криза системи охорони здоров'я і соціального захисту населення. Саме негативні тенденції в економіці та накопичені соціальні проблеми створюють суттєві загрози національній безпеці та подальшому розвитку суспільства.

Слід зауважити, що найбільшою загрозою, яка, можливо, поклала початок і всім наступним загрозам соціальній безпеці України, є саме низький рівень соціальної орієнтованості економіки, який проявляється в неусвідомленості органів державного управління соціальної складової і, як наслідок, функціонування незначного фінансування соціальних програм із застосуванням лише вторинного значення соціальних заходів поряд з економічними і політичними питаннями.

У науково-технологічній сфері до загроз національній безпеці віднесено: відтік наукових кадрів з України в зарубіжні держави (продовження фактичної «викачки мізків»); критичний рівень науково-технологічного відставання України від провідних держав світу; проведення непродуманих освітніх реформ, результатом яких може стати зникнення ряду наукових шкіл, зниження якості вищої освіти, падіння рівня науково-технологічного розвитку України [2].

У сучасному світі все більшого значення набувають економічні та інформаційні аспекти забезпечення безпеки. Економічна криза в умовах глобалізації світової економіки може в лічені години дестабілізувати народне господарство країн, розташованих одна від одної за тисячі кілометрів. Важко уявити собі й можливі наслідки порушення.

Наразі у сучасному світі найбільшого значення набувають не тільки економічні, але і інформаційні аспекти забезпечення безпеки. Економічна криза в умовах глобалізації світової економіки може дуже швидко дестабілізувати ситуацію в країнах, які розташовані одна від одної за тисячі кілометрів, і це також, на нашу думку, є загрозою. Важко представити можливі наслідки порушення функціонування інформаційних мереж, бо саме інформація є важливим економічним, політичним, а також соціальним ресурсом. Також, нерозв'язані глобальні проблеми сучасності, такі як: екологічна, енергетична, продовольча – також досить наповнюють новим змістом поняття міжнародної безпеки.

Висновки

Підсумовуючи вищевказане, варто наголосити на тому, проблеми управління в сфері національної безпеки на сьогодні постають у центрі уваги більшості цивілізованих країн світу. І причиною такої уваги є глобальне середовище безпеки, яке сьогодні містить досить велику кількість як загроз, так і викликів найрізноманітнішого характеру.

Список використаної літератури

1. Указ Президента України Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 14 вересня 2020 року «Про Стратегію національної безпеки України» № 392/2020. Електроний ресурс. Режим доступу: https://www.president.gov.ua/documents/3922020-35037

2. Аналіз державної політики у сфері національної безпеки і оборони України. URL: https://rpr.org.ua/wp-content/uploads/2018/02/Analiz-polityky-NB-pravl-final.pdf

3. Моргалюк О. В.Проблема забезпечення національної безпеки в умовах глобалізації. URL: https://bit.ly/3O47Ru9

4. Про Національну безпеку: Закон України від 21 червня 2018 року № 2469-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19#Text

5. Varnalij, Z. S. (2009), Ekonomichna bezpeka [Economic security], Znannia, Kyiv, Ukraine.

References

1. Decree of the President of Ukraine On the Decision of the National Security and Defence Council of Ukraine of 14 September 2020 'On the National Security Strategy of Ukraine' No. 392/2020. Electronic resource. Access mode: https://www.president.gov.ua/documents/3922020-35037

2. Analysis of state policy in the field of national security and defence of Ukraine. URL:https://rpr.org.ua/wp-content/uploads/2018/02/Analiz-polityky-NB-pravl-final.pdf

3. The problem of ensuring national security in the context of globalisation. URL: https://bit.ly/3O47Ru9

4. On National Security: Law of Ukraine of 21 June 2018 No. 2469-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19#Text

5. Varnalij, Z. S. (2009), Ekonomichna bezpeka [Economic security], Znannia, Kyiv, Ukraine

УДК 332.143 : 37.013.78 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.47

О. О. БІЛИК
доктор наук з державного управління, доцент,
проректор з науково-педагогічної роботи та моніторингу якості освіти
КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти»
ORCID: 0000-0001-5088-1115

АВТОМАТИЗОВАНІ РОБОЧІ МІСЦЯ ПРАЦІВНИКІВ СФЕРИ УПРАВЛІННЯ ЯК ТЕХНІЧНИЙ СУПРОВІД ПРОЦЕСІВ У ДЕРЖАВНОМУ УПРАВЛІННІ

У статті розкриваються питання технічної оснащеності суб'єктів і об'єктів державного управління, до чого відносяться обладнані комп'ютерами і периферійними пристроями робочі місця державних службовців, призначені для виконавчих функцій і регулюючих дій автоматизовані платформи, як «цифрове управління» і «електронне урядування». Доведено, що від цього залежить здатність державних установ, які включають органи влади та місцевого самоврядування, не лише спрямувати виконавчі функції і проявляти дії підвідомчим та підпорядкованим об'єктам, але виходити та отримувати доступ до різних середовищ і просторів. І саме таким осередком, як робоче місце державного управлінця та службовця, відображається рівень технічної оснащеності та здатність провадити управлінські ресурси і процеси, налагоджуючи взаємозв'язки і проводячи спільні заходи із всіма тими, до кого є доступ та ведуться діалоги. Це засвідчується тим, що високотехнологічне обладнання, яким оснащені робочі середовища, виявляє сутність державного управління та його розвитку, на підставі чого чітко і оперативно виявляються зворотні реакції від різних об'єктів впливу. Тому як з технічної точки зору, так і з питань державного управління важливо розглядати цей напрям, оскільки він є перспективним і має потенціал щодо досягнення прогресу державного управління. Таким чином, автоматизовані робочі місця працівників органів влади, місцевого самоврядування та інших службовців є чітким відображенням новизни та технологічності державного управління. Бо від цього залежить технічний супровід справ і заходів, які прикріплюються виконавчими функціями та регулюючими діями в середовищах, різноманітних просторах, керованих об'єктах і процесах. Цим відображається оснащення міністерств, відомств, відділів, служб, інших структурних одиниць різноманітними за версіями і функціональністю технічними засобами. Через оснащення робочого місця за автоматизованою формою постійно існує можливість виходити до будь-якого простору, об'єктів, відслідковувати процеси, вести відносини із іншими користувачами, в режимі реального часу спрямовувати керуючі і регулюючі дії. З точки зору структурного відображення середовищ і просторів, де розташовані АРМ, ґрунтується перебіг взаємовідносин і поєднаних з ними інформаційних потоків, на основі чого від керівного складу до виконавців пересилаються завдання, розпорядження, обов'язки, вимоги та отримується звітна документація разом із підвідомчими даними. Тому доречно проводити подальші дослідження структурних утворень в державному управлінні, якими є оснащені технічними засобами робочі місця працівників органів влади, місцевого самоврядування, інших службовців залежно від обсягів виконавчих функцій та повноважень, на що впливають глобальні чинники цифрової трансформації.

Ключові слова: *держава, державне управління, технологія, автоматизоване робоче місце, інформація.*

O. O. BILYK
Doctor of Science in Public Administration, Associate Professor,
Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work and Monitoring
of Education Quality
KZVO "Vinnytsia Academy of Continuing Education"
ORCID: 0000-0001-5088-1115

AUTOMATIZED WORKPLACES OF ADMINISTRATIVE EMPLOYEES AS TECHNICAL SUPPORT OF PROCESSES IN PUBLIC ADMINISTRATION

The article reveals the issues of technical equipment of subjects and objects of public administration, which include workplaces of civil servants equipped with computers and peripheral devices, automated platforms intended for executive functions and regulatory actions, such as «digital governance» and «e-governance». It is proved that the ability of state institutions, which include authorities and local self-government, not only to direct executive functions and take actions to subordinate and subordinate objects, but also to go out and gain access to various environments and spaces depends on this. And it is precisely such a center as the workplace of a public administrator and employee that reflects the level of technical equipment and the ability to conduct management resources and processes, establishing relationships and conducting joint activities with all those to whom there is access and dialogues are conducted. This is evidenced by the fact that the high-tech equipment with which the working environments are equipped reveals the essence of public administration and its development, on the basis of which the feedback from various objects of influence is clearly

and promptly detected. Therefore, both from a technical point of view and from the point of view of public administration, it is important to consider this direction, since it is promising and has the potential to achieve progress in public administration. Thus, automated workplaces of employees of government bodies, local governments and other employees are a clear reflection of the novelty and technologicality of public administration. Because the technical support of cases and events that are attached to executive functions and regulatory actions in environments, various spaces, managed objects and processes depends on this. This reflects the equipping of ministries, departments, departments, services, and other structural units with technical means of various versions and functionality. By equipping the workplace in an automated form, there is always the opportunity to go to any space, objects, monitor processes, maintain relations with other users, and direct management and regulatory actions in real time. From the point of view of the structural representation of the environments and spaces where the workstations are located, the course of relationships and information flows associated with them are based, on the basis of which tasks, orders, responsibilities, requirements are sent from the management to the executors and reporting documentation is obtained together with subordinate data. Therefore, it is appropriate to conduct further research into structural formations in public administration, which are equipped with technical means workplaces of employees of government bodies, local governments, and other employees depending on the scope of executive functions and powers, which are influenced by global factors of digital transformation.

Key words: *state, public administration, technology, automated workplace, information.*

Постановка проблеми

В умовах цифрової трансформації управлінської діяльності актуальними є процеси, які стосуються технічної оснащеності конкретних середовищ у вигляді робочих місць, де перебувають органи державної влади, місцевого самоврядування, інші державні службовці, які здійснюють виконавчі функції, регулювальні дії і процеси, ведуть взаємозв'язки із підпорядкованими об'єктами як сфери діяльності, сучасне суспільство та ін. Цим характеризується вплив зовнішнього середовища у вигляді цифровізації управління та високотехнологічній оснащеності просторів, до яких, звісно, причетне державне управління. Оскільки такі перетворення мають безупинний характер, то слід вважати це головним напрямом наукового дослідження. Це означає, що в дійсності такі прогресивні процеси на державному рівні відбуваються інтенсивно та комплексно, що вимагає розглядати сутнісну характеристику автоматизації робочих місць у тих структурних утвореннях, які відносяться до просування управлінських дій і впливів за рахунок користування ІКТ та призначеними для цього іншими технічними засобами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

До вчених, які досліджували технологічну складову державного управління, відносяться М. О. Баймуратов, М. О. Бєссєдін, Є. І. Бородін, І. І. Новаківський, Ю. А. Олександренко, В. С. Пономаренко, І. А. Чикаренко та ін. Незважаючи на це, до сих пір потребує обґрунтування керуючих і регулюючих дій та впливів, які виходять з держави, через спеціалізовані та технічно оснащені робочі місця, за якими підвідомчі державі структурні утворення та сфери діяльності, наприклад, освіта – провадять свою діяльність.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є всебічне обґрунтування функцій і процесів державного управління шляхом технічного оснащення автоматизованих робочих місць.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розвиток автоматизованих систем управління характеризується розширенням взаємозв'язків окремих систем і підсистем, які об'єднують управління технологічними процесами, оперативне управління, оперативне і поточне планування, адміністративно – господарську діяльність, проектування, пробне і остаточне введення в експлуатацію технічних засобів, і мають тенденцію до об'єднання їх у загальну багаторівневу систему інтегрованого управління об'єктом у цілому. Такі багаторівневі ієрархічні автоматизовані системи повинні забезпечити погоджене і взаємозв'язане управління усіма видами діяльності [7, с. 379].

Сучасні комп'ютерні комплекси, які використовуються у вигляді автоматизованих робочих місць (АРМ) користувачів різних рівнів і в яких здійснюється системна обробка економічної інформації, а також локальні мережі, які створюються у межах підприємства, складають технічну базу автоматизованої системи управління (АСУ). Тоді як АРМ – це робоче місце АСУ, яке призначене для будь-якого державного службовця, обладнане комп'ютерними та інформаційно-комунікаційними технологіями, поєднане комп'ютерними мережами, на основі чого керівництво підвідомчими організаціями і установами має можливості під час виконання власних функцій, повноважень і проведення регуляторних дій відповідно до структурного відображення АСУ. Класифікації АРМ відбуваються за такими основними ознаками [5]:

– за функціональною спрямованістю – АРМ технічного і допоміжного персоналу, АРМ фахівця, АРМ керівника тощо;

– за рівнем використання ІКТ – АРМ низового рівня, АРМ середнього рівня, АРМ високого рівня;

– за формою організації державних службовців і підвідомчих виконавців, де робочі місця яких обладнані комп'ютерами – індивідуальні і групові, одноапаратні і багатоапаратні.

Такий підхід до організації системи комплексів АРМ в умовах АСУ дозволить:

– забезпечити взаємозв'язок процесів збирання і обробки інформації по горизонталі (між територіальними відділами державних установ) на кожному рівні, по кожній предметній області – ресурсозабезпечувальній підсистемі;

– оперативно і всебічно забезпечити по кожній підсистемі і на всіх рівнях (по вертикалі) рішення функціональних питань управління (нормування і регламентація, планування, облік і контроль, звітність, аналітичні дослідження і прийняття рішень) по усіх видах здійснення виконавчих функцій державними службовцями;

– оперативно здійснювати інформування керівників і спеціалістів різних рівнів достовірною і повною інформацією про стан ресурсів, особливо в пріоритетних напрямах державного управління, а також про процеси і операції, які відбуваються у підвідомчих просторах, структурах, об'єктах;

– вирішити проблему своєчасного автоматизованого формування достовірних результатів як державного управління в цілому, так і середовищ, сфер діяльності за галузевими призначеннями, суспільних груп, муніципалітетів зокрема, чим характеризується місцеве самоврядування, а також одержання відповідних критеріїв для складання звітної документації за різні періоди часу.

В практичному плані система комплексів АРМ на підприємстві може мати таку структуру, яка становить технічну основу оперативного і автоматизованого управління у державі на високому якісному рівні.

Інформаційне забезпечення системи комплексів АРМ передбачає організацію такої інформаційної бази, яка б регламентувала інформаційні зв'язки, забезпечувала необхідними данними всі АРМ тощо. Розподілена база данних забезпечує роздроблення її на півбази, які розміщуються на окремих АРМ; простоту доступу до будь – якої підбази з урахуванням санкціонованого доступу; високу продуктивність маніпулювання данними тощо. Структура ж інформаційного забезпечення повинна забезпечувати оптимізоване концентрування і розміщення данних, зручність організації архіву тощо.

Потрібно зазначити, що формування розподілених баз даних, які комплектуються умовно – постійною інформацією, в багаторівневих інтегрованих АСУ здійснюється поступово, у безперервному процесі, шляхом нагромадження інформації за різними формами. Вся ця накопичена умовно – постійна інформація потім використовується при автоматизації початкових бланків документації, додаючи до них нові, доопрацьовані та уточнені дані.

Програмне забезпечення АРМ складається з загального або системного, функціонального або прикладного програмного забезпечення, до якого входить також як самостійна частина, що описана математичною мовою. Загальне або системне програмне забезпечення включає операційну систему і прикладні програми, які розширюють її, а також інтерактивні засоби діалогового режиму тощо. Цей вид забезпечення призначений для управління всіх дій і операцій процесора; забезпечення послідовністю доступу до пам'яті, периферійних засобів і мережі; масивами; процесами виконання прикладних програм. Функціональне або прикладне програмне забезпечення призначене для автоматичного розв'язання функціональних задач при управлінні об'єктом, у тому числі оптимізації, прогнозування, мережного планування і управління, моделювання тощо. Додаткові засоби програмного забезпечення характеризуються широким діапозоном застосування і масовим випуском від загальновідомих в світовому масштабі компаній.

Комплекс діалогових (інтерактивних) програмних засобів, які організовані у формі пристроїв, інтерфейсів та автоматизованих платформ для спілкувань і висловлень користувачами власних точок зору щодо реального стану речей, забезпечують «меню» (для вибрання одного з багатьох дій), «заповнення шаблону» (для вводу форматованої інформації у вигляді таблиць), «питання – відповідь» (для цілеспрямованого пошуку процесів під час прийняття користувачами рішень в системі державного управління, де сформовані напрацювання передаються до освітньої сфери з метою її перетворення за якісними ознаками і технічною оснащеністю згідно прописаних у цільових програмах заходів, тобто – її модернізації з метою отримання результатів і досягнення ефективності) тощо [8, с. 73].

Тому структурна система комплексів АРМ об'єднується у вигляді глобальних або локальних мереж, до яких підключені та поєднані між собою ІКТ, термінали та інші периферійні пристрої, що взаємопов'язані між собою за допомогою каналів комунікації, зв'язку, інших більш функціональних технічних засобів, пристроїв, автоматизованих платформ (рис. 1). Від цього ґрунтуються топологічні структури мереж, які класифікуються за такими типами: централізовані, децентралізовані, кільцеві, радіально – кільцеві.

Для реалізації основних функцій локальних мереж (обмін даними між користувачами і системами, рішення функціональних задач, занесення і отримання інформації з баз даних тощо) на логічному рівні включають робочу, термінальну, адміністративну, інтерфейсну і комунікаційну системи. Робоча система повинна реалізувати інформаційні процеси, які пов'язані з організацією, зберіганням, пошуком і обробкою даних.

Адміністративна система здійснює управління процесами функціонування інформаційної обчислювальної мережі, яка включає документування роботи основних елементів мережі, накопичення статистичних даних, видачу різних довідок і звітів про роботу мережі, контроль за діагностикою несправностей мережі тощо.



Рис. 1. Особливості взаємозв'язку комплексів задач підсистеми інформаційного забезпечення для регіональної системи освіти в Україні

Інтерфейсна система реалізовує функції, які пов'язані з перетворенням процедури управління та інформації, що передається у взаємодії з іншими мережами або нестандартними абонентськими пристроями.

Комунікаційна система орієнтована на виконання функцій, які пов'язані з забезпеченням взаємодії всіх систем, що управляють потоками даних, їх маршрутизацією і веденням діалогових спілкувань.

При організації АСУ для органів державної влади і місцевого самоврядування з використанням АРМів повинні виконуватися і дотримуватися такі принципи:

– автоматизоване оброблення облікових даних у реальному часі безпосередньо на робочих місцях державних службовців;

– взаємодія користувачів з програмним забезпеченням у комп'ютері в діалоговому режимі;

– організація автоматизованої документації на найбільш поширених носіях, як USB, що зчитуються програмами Microsoft Word та Excel;

– організація регістрів документації у пам'яті комп'ютера, формування і видача результатної інформації в режимі запиту, необхідному для державного службовця як користувача обсязі.

Отже, АРМ в системі державного управління розглядається як робоче місце, оснащене комп'ютерами, ІКТ, іншими пристроями, які дають змогу автоматизувати отримання, організацію, оброблення та передачу облікової інформації, поєднуючи традиційні функції управління і контролю над інформаційним процесом документування, вибору і прийняття управлінських рішень [6, с. 207]. При цьому державний службовець як користувач виступає в новій для нього ролі кінцевого користувача АРМу.

Організаційно ІКТ стосовно руху автоматизованої документації на комп'ютерах реалізується мережею АРМів, що створюються в місцях та каналах виникнення і використання інформації. Мережа АРМів може організовуватися за одно-, дво- і багаторівневою організаційною структурою підвідомчих державі установ і об'єктів. За цим принципом їх класифікують на АРМи низового, загального рівня та зведеної у автоматизованій документації інформації.

АРМи низового рівня використовують для оформлення первинних документів, ведення локальної бази даних, оперативного введення даних про випуск, рух матеріально-технічного забезпечення, передачі первинних документів і звітів, а також їхніх аналогів або за каналами комунікації та зв'язку на загальнодержавний рівень системи.

АРМи низового рівня мають функціонувати в режимі реального часу. При цьому в одному процесі поєднуються оформлення через автоматизовані бланки початкової документації і введення інформації на комп'ютерах.

Відповідальність за підтримку та ведення баз даних покладається на користувачів комп'ютерної техніки.

Для контролю в системі кожного АРМу необхідно реєструвати дату операції, процесу і заходу згідно цільових комплексних програм, номер документа, що вводиться в оброблення і код особи, яка виконала реєстрацію операції. Має бути передбачений також санкціонований доступ до цієї інформації, щоб виключити дозапис, вилучення або виправлення даних.

Основу технології виконання державних функцій органами державної влади та місцевого самоврядування складає ведення на АРМах внутрішніх електронних регістрів, сукупність яких може бути названа «динамічною книгою» користувача [2, с. 21].

Внутрішні регістри мають подвійне призначення: вони виступають як файли й одночасно як вихідні відеограми та машинограми, що можуть бути видані в повному обсязі або фрагментарно за певний період.

На АРМах низового рівня самостійно за заданими функціями здійснюється ведення регістрів з поточного контролю й оперативного управління.

На АРМі зведеної документації здійснюють введення і контроль машинних носіїв АРМів дільниць інформаційного забезпечення або через ЛОМ (локальні операційні мережі) – документування та відображення введених даних.

До складу файлової системи АРМу входять:

1. Допоміжні файли заготовок форм первинних документів (документограм). При документуванні господарських операцій користувач бачить на екрані дисплея відповідну форму і з використанням клавіатури вводить в документ оперативні дані та ключові реквізити, за якими система автоматично заповнює графи НДІ і виконує потрібні обчислення. Одночасно введений запис надходить у файли вхідних форм відповідно до прийнятої в них систематизації даних.
2. Довідкові файли класифікаторів, призначені для розшифрування кодових позначень у вихідних повідомленнях.
3. Допоміжні файли заготовок форм регламентних вихідних регістрів – машинограм (відеограм), які створюються в разі використання спеціальних засобів програмного забезпечення, що оперують табличними (сторінковими) файлами.
4. Інформаційні файли норм використання матеріально-технічного забезпечення, часу, складання графіків робіт.
5. Інформаційні файли для ведення вступної документації.
6. Файли з інформацією минулих періодів (формуються автоматично та підлягають архівуванню).

Основу системного автоматизованого оброблення даних складають файли початкової і проміжної документації разом із звітністю) [4, с. 302–337].

Операції по обробці і передачі платіжних документів у регіональній системі управління освітою в Україні мають такий вигляд (рис. 2).

Надалі слід зазначити, що система управління будь-якого об’єкту діяльності у відповідності до його організаційної структури містить керуючу і керовану частини, що являють собою єдине ціле і пов’язані між собою за рахунок каналів передавання постійно циркулюючої у такому просторі інформації. І в результаті цього виникає зворотній зв’язок, що означає саме процес державного управління у середовищах, сферах, суспільних групах, територіальних громадах, муніципалітетах тощо [1, с. 15]. А вплив керуючої частини управлінської системи на керовану характеризується складовими системного підходу як вхід, вихід, канали зв’язку і задіяні в ході ведення виробничих процесів, відображений на рис. 3 [3].

Інформація в АСУ проходить через канали зв’язку та комп’ютерні мережі, які містять упорядковану послідовність просування інформаційних потоків, що за допомогою технічних засобів і комп’ютерної техніки через вхід і вихід надходять користувачам.

Через вхід надходить нормативна інформація, документи розпорядчого характеру, настанови для вирішення поточних завдань, а через вихід – інформація для планування, звітна документація, цільові комплексні програми, концепції, стратегії – із призначенням для конкретних об’єктів, процесів, середовищ, сфер діяльності.

В залежності від специфіки управління в організаціях і установах з точки зору держави та від порядкового їх простору (характерної для конкретних середовищ і сфер діяльності), діючих умов упорядкування процесу здійснення виконавчих функцій органами державної влади та місцевого самоврядування потрібно в АСУ потрібно встановити:

– види інформації, частоту її передавання з місць виникнення і метод формування носіїв проміжних даних відповідно до їх джерел в автоматизованих бланках документації;
– види нормативної інформації, яка підлягає найбільшому використанню стосовно ведення керуючих і регулюючих дій, здійснення виконавчих функцій і повноважень;
– доцільність використання технічних засобів і комп’ютерної техніки, інших автоматизованих інформаційних технологій, технічних пристосувань для збору інформації у комп’ютерах та технічних засобах комунікації і зв’язку;
– частоту і обсяг вирішуваних завдань із використанням комп’ютерної техніки;
– інформацію, використовувану операційно-плановими відділами і службами для здійснення керуючих процесів, передбачення ймовірних результатів і досягнень, їх обсяг.

Важливішими елементами в АСУ є: джерела первинної інформації (первинні або вихідні документи), перетворювачі інформації (процес внесення інформації у документ, наприклад, накопичувальну відомість), користувачі задокументованої інформації (відділ, група, відповідальні особи).

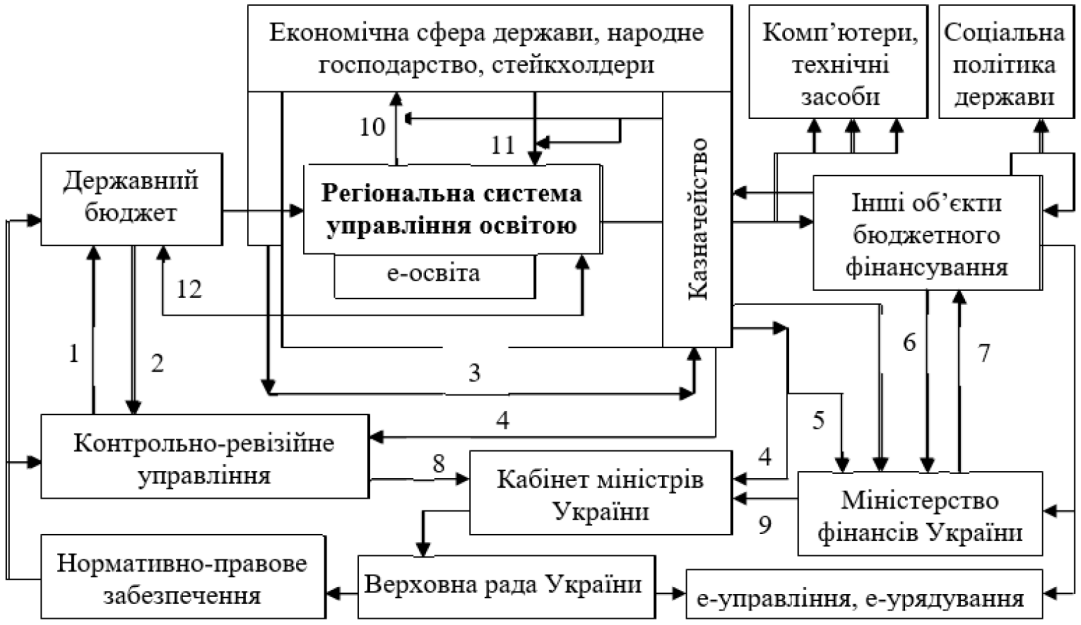


Рис. 2. Схема інформаційних зв'язків між системою державного управління та регіональною системою управління освітою: 1 – інструкції, перевірки, санкції; 2 – реєстри, накопичувальні відомості, декларації, 3 – інформація від казначейства стосовно виділення коштів з бюджету; 4 – звітність казначейства; 5 – інформація про надходження коштів з бюджету у заклади освіти; 6 – звітна документація із освітніх закладів; 7 – перевірки, ревізії; 8 – статистична звітність від закладів освіти; 9 – звітність про освоєння коштів, виділених з бюджету; 10 – спрямування надлишкових коштів, пов'язаних із взаємозв'язками економічної сфери держави (стейкхолдерами), як залучення контактів, взаєморозрахунки із комерційними банками шляхом депозитних внесків та ін.; 11 – отримання від економічної сфери держави коштів на власний розвиток освітньої сфери, наприклад, у вигляді грантів; 12 – надходження та повернення коштів за борговими зобов'язаннями

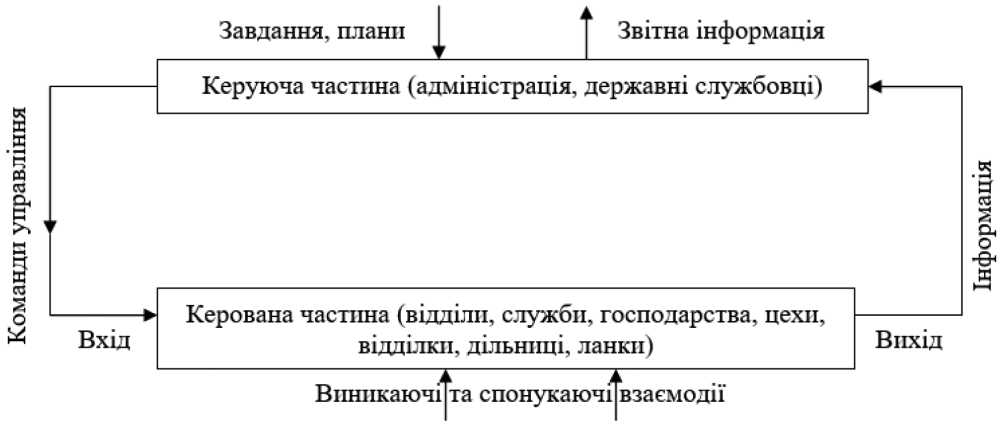


Рис. 3. Схема організаційної взаємодії на керовану частину в системі державного управління як основи для е-управління і е-урядування

Також рис. 3 означає, що управлінські дії і процеси здійснюються вищою ієрархією керівництва в межах отриманих первинних даних, тоді як прийняття рішень здійснюється лише в межах обробленої інформації.

Обґрунтування і прийняття управлінських рішень у системі державного управління всіма органами державної влади та місцевого самоврядування являє собою попереднє виявлення і вивчення взаємозв'язків і взаємовідносин між елементами, підсистемами і об'єктами управління (відділів, служб, структурних одиниць), які найбільше підлягають управлінським діям і процесам [9, с. 39]. Тому роль ІКТ в цьому полягає у зміцненні комунікацій, тобто взаємозв'язків у головну чергу органів державної влади і місцевого самоврядування між собою, що в подальшому переходитиме у найбільші сфери суспільного буття. Тому освітня сфера в державі взаємозв'язана із організаціями і установами та залучена до системи державного управління не лише комп'ютерами, але і технічними засобами

комунікаціями і зв'язку, якими постійно користуються у повсякденному житті – як складових системи управління. І це також є осередком для виникнення АСУ та розповсюдження її компонентів, яка концентрує у власному просторі АРМ для державних службовців при виконанні покладених на них функцій і повноважень, а також подальших забезпечень взаємозв'язків із закладами освіти та викладацьким складом у освітній сфері.

Висновки

Саме робочі місця працівників органів влади, місцевого самоврядування та інших службовців є чітким відображенням новизни та технологічності державного управління. Бо від цього залежить технічний супровід здійснення справ і заходів, які прикріплюються виконавчими функціями та регулюючими діями у середовищах, різноманітних просторах, керованих об'єктах і процесах. Цим відображається оснащення міністерств, відомств, відділів, служб, інших структурних одиниць різноманітними за версіями і функціональністю технічними засобами та під'єднаними до них допоміжними пристроями. Через таке оснащення робочого місця за автоматизованою формою постійно існує можливість виходити до будь-якого простору, об'єктів, відслідковувати процеси, вести відносини із іншими користувачами, в режимі реального часу спрямовувати керуючі і регулюючі дії. З точки зору структурного відображення середовищ і просторів, де розташовані АРМ, ґрунтується перебіг взаємовідносин і під'єднаних до них інформаційних потоків, на основі чого від керівного складу до виконавців пересилаються завдання, розпорядження, обов'язки, вимоги і отримується звітна документація разом із підвідомчими даними. І тому доречно проводити подальші дослідження структурних утворень в державному управлінні, які відносять до свого складу оснащені технічними засобами робочі місця органів влади, місцевого самоврядування, інших службовців залежно від обсягів виконавчих функцій та повноважень, на що впливають глобальні чинники цифрової трансформації суспільства.

Список використаної літератури

1. Баймуратов М. О. Муніципальна влада в системі публічної влади в Україні в умовах муніципальної реформи. *Муніципальна реформа в контексті євроінтеграції України: позиція влади, науковців, профспілок та громадськості*: Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Київ, 08 грудня 2017 р.). К. : ТОВ «Підприємство ВІ.ЕН.ЕЙ», 2017. С. 12–16. URL: https://www.socosvita.kiev.ua/sites/default/files/Tezy_conf_08_12_17_site.pdf

2. Батанов О. В. Концептуальні засади муніципальної реформи в Україні та її міжнародно-правові аспекти. *Муніципальна реформа в контексті євроінтеграції України : позиція влади, науковців, профспілок та громадськості*: Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції (м. Київ, 08 грудня 2017 р.). Київ, ТОВ «Підприємство ВІ.ЕН.ЕЙ», 2017. С. 20–25. URL: https://www.socosvita.kiev.ua/sites/default/ files/Tezy_conf_08_12_17_site.pdf

3. Бєсєдін М. О., Нагаєв В. М. Основи менеджменту : підручник. Київ : Центр навальної літератури, 2005. 496 с.

4. Інформаційні системи і технології в економіці : посібник для студентів вищих навчальних закладів. За редакцією В. С. Пономаренка. Київ : Видавничий центр «Академія», 2002. 544 с. С. 302–337.

5. Новаківський І. І., Грибик І. І., Смолінська Н. В. Інформаційні системи в менеджменті : адаптивний підхід : підручник. Київ : Кондор, 2019. 440 с.

6. Олександренко Ю. А. Особливості підходів при розробці системних моделей та їх використанні у державному управлінні. *Інвестиції: практика та досвід*, 2014. № 17. С. 205–208. URL : http://www.investplan.com.ua/ pdf/17_2014/46.pdf

7. Ромін А. В. Удосконалення державного регулювання діяльності вищих навчальних закладів. *Актуальні проблеми державного управління*. 2015. Вип. 1(47). С. 376–381. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/apdy_2015_1_54

8. Тусупова Л. А., Базика С. К. Уніфікація механізмів парламентського контролю у сфері публічних фінансів. *Вісник Національної академії державного управління при Президентові України*. 2018. № 4. С. 71–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnaddy_2018_4_12

9. Чикаренко І. А., Бородін Є. І. Програмно-цільовий інструментарій управління розвитком та співробітництвом об'єднаних територіальних громад. Децентралізація влади в Україні : оцінювання результатів формування та розвитку самодостатніх громад : монографія / за заг. та наук. ред. С. М. Серьогіна, І. А. Чикаренко. Дніпро ДРІДУ НАДУ, 2019. С. 38–43. URL: https://grani-print.dp.ua/index.php/home/article/view/100

References

1. Baimuratov, M. O. (2017) Munitsypalna vlada v systemi publichnoi vlady v Ukraini v umovakh munitsypalnoi reform. *Munitsypalna reforma v konteksti yevrointehratsii Ukrainy: pozytsiia vlady, naukovtsiv, profspilok ta hromadskosti*: Tezy dopovidei Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii (m. Kyiv, 08 hrudnia 2017 r.). K. : TOV "Pidpryiemstvo VI.EN.EI". S. 12–16. URL : https://www.socosvita.kiev.ua/sites/default/files/Tezy_ conf_08_12_17_site.pdf [in Ukrainian].

2. Batanov, O. V. (2017) Kontseptualni zasady munitsypalnoi reformy v Ukraini ta yii mizhnarodno-pravovi aspekty. . Tezy dopovidei Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii (m. Kyiv, 08 hrudnia 2017 r.). Kyiv, TOV "Pidpryiemstvo VI.EN.EI". S. 20–25. URL : https://www.socosvita.kiev.ua/sites/default/ files/Tezy_conf_08_12_17_site.pdf [in Ukrainian]

3. Biesiedin, M. O., Nahaiev, V. M. (2005) Osnovy menedzhmentu : pidruchnyk. Kyiv : Tsentr navalnoi literatury. 496 s. [in Ukrainian].

4. Informatsiini systemy i tekhnolohii v ekonomitsi : posibnyk dlia studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv. Za redaktsiieiu V. S. Ponomarenka. Kyiv : Vydavnychyi tsentr "Akademiia", 2002. 544 s. S. 302–337 [in Ukrainian].

5. Novakivskyi, I. I., Hrybyk, I. I., Smolinska, N. V. (2019) Informatsiini systemy v menedzhmenti : adaptyvnyi pidkhid : pidruchnyk. Kyiv : Kondor. 440 s. [in Ukrainian].

6. Oleksandrenko, Yu. A. (2014) Osoblyvosti pidkhodiv pry rozrobtsi systemnykh modelei ta yikh vykorystanni u derzhavnomu upravlinni. *Investytsii: praktyka ta dosvid*. № 17. S. 205–208. URL : http://www.investplan.com.ua/pdf/17_2014/46.pdf [in Ukrainian].

7. Romin, A. V. (2015) Udoskonalennia derzhavnoho rehuliuvannia diialnosti vyshchykh navchalnykh zakladiv. *Aktualni problemy derzhavnoho upravlinnia*. Vyp. 1(47). S. 376–381. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/apdy_2015_1_54 [in Ukrainian].

8. Tusupova, L. A., Bazyka, S. K. (2018) Unifikatsiia mekhanizmiv parlamentskoho kontroliu u sferi publichnykh finansiv. *Visnyk Natsionalnoi akademii derzhavnoho upravlinnia pry Prezydentovi Ukrainy*. № 4. S. 71–77. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vnaddy_2018_4_12 [in Ukrainian].

9. Chykarenko, I. A., Borodin, Ye. I. (2019) Prohramno-tsilovyi instrumentarii upravlinnia rozvytkom ta spivrobitnytstvom obiednanykh terytorialnykh hromad. Detsentralizatsiia vlady v Ukraïni : otsiniuvannia rezultativ formuvannia ta rozvytku samodostatnikh hromad : monohrafiia / za zah. ta nauk. red. S. M. Serohina, I. A. Chykarenko. Dnipro DRIDU NADU. S. 38–43. URL: https://grani-print.dp.ua/index.php/home/article/view/100 [in Ukrainian].

УДК 339.92:061.1ЄС DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.48

О. В. ЄФАНОВ
аспірант кафедри публічного врядування
Інститут адміністрування, державного управління та професійного розвитку
Національного університету «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0000-1638-3307

НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ У СФЕРІ ПУБЛІЧНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ФОРМУВАННЯ ЗОНИ ВІЛЬНОЇ ТОРГІВЛІ МІЖ УКРАЇНОЮ ТА ЄС

У статті розглядаються особливості нормативно-правового регулювання у сфері публічного управління процесами формування зони вільної торгівлі між Україною та ЄС. Відмічено, що недостатня правова визначеність, інституційна слабкість окремих державних органів та недостатній рівень імплементації європейських норм у національне законодавство створюють значні перешкоди на шляху ефективного функціонування зони вільної торгівлі. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю комплексного аналізу нормативно-правового регулювання у сфері публічного управління процесами формування зони вільної торгівлі між Україною та ЄС, визначення його ключових недоліків і розробки рекомендацій щодо вдосконалення правових та інституційних механізмів регулювання у цій сфері.

Мета статті полягає в дослідженні особливостей нормативно-правового регулювання у сфері публічного управління процесами формування зони вільної торгівлі між Україною та ЄС.

Визначено, що для ефективного функціонування зони вільної торгівлі між Україною та ЄС було ухвалено та адаптовано низку нормативно-правових актів, які регулюють митну політику, технічні стандарти, сертифікацію, торговельні правила та механізми правозастосування. Розглянуто основні законодавчі акти України, що регулюють функціонування зони вільної торгівлі. Акцентовано увагу на державних органах, які забезпечують функціонування інституційного механізму публічного управління у сфері регулювання зони вільної торгівлі. Досліджено проблеми, що ускладнюють повноцінне функціонування зони вільної торгівлі. Обґрунтовано дії та заходи, які необхідно забезпечити для підвищення ефективності публічного управління у сфері зони вільної торгівлі.

Результати дослідження показали, що подальше вдосконалення нормативно-правового регулювання у сфері публічного управління процесами формування зони вільної торгівлі між Україною та ЄС є важливою передумовою інтеграції України до європейського економічного простору та створення сприятливих умов для розвитку вітчизняного бізнесу. Підкреслено, що подальша імплементація європейських норм дозволить підвищити конкурентоспроможність українських товарів і сприяти інтеграції України у спільний ринок ЄС.

Ключові слова: *нормативно-правове регулювання, публічне управління, зона вільної торгівлі, законодавство, імплементація, правові норми.*

O. V. YEFAFOV
Postgraduate Student at the Department of Public Administration
Institute of Administration, Public Administration and Professional Development
of Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0000-1638-3307

REGULATORY AND LEGAL REGULATION IN THE SPHERE OF PUBLIC ADMINISTRATION OF THE PROCESSES OF FORMATION OF THE FREE TRADE AREA BETWEEN UKRAINE AND THE EU

The article examines the features of regulatory and legal regulation in the field of public management of the processes of forming a free trade area between Ukraine and the EU. It is noted that insufficient legal certainty, institutional weakness of individual state bodies and insufficient level of implementation of European norms into national legislation create significant obstacles to the effective functioning of the free trade area. The relevance of the study is due to the need for a comprehensive analysis of regulatory and legal regulation in the field of public management of the processes of forming a free trade area between Ukraine and the EU, identification of its key shortcomings and development of recommendations for improving legal and institutional mechanisms of regulation in this area.

The purpose of the article is to study the features of regulatory and legal regulation in the field of public management of the processes of forming a free trade area between Ukraine and the EU.

It is determined that for the effective functioning of the free trade area between Ukraine and the EU, a number of regulatory and legal acts were adopted and adapted that regulate customs policy, technical standards, certification, trade rules and enforcement mechanisms. The main legislative acts of Ukraine regulating the functioning of the free trade zone are considered. Attention is focused on state bodies that ensure the functioning of the institutional mechanism

of public administration in the field of regulating the free trade zone. Problems that complicate the full functioning of the free trade zone are investigated. Actions and measures that need to be provided to increase the efficiency of public administration in the field of the free trade zone are substantiated.

The results of the study showed that further improvement of regulatory and legal regulation in the field of public administration of the processes of forming a free trade zone between Ukraine and the EU is an important prerequisite for Ukraine's integration into the European economic space and the creation of favorable conditions for the development of domestic business. It is emphasized that further implementation of European norms will increase the competitiveness of Ukrainian goods and contribute to Ukraine's integration into the EU common market.

Key words: *regulatory and legal regulation, public administration, free trade zone, legislation, implementation, legal norms.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах євроінтеграції України особливу увагу привертає нормативно-правове регулювання у сфері публічного управління процесами формування Зони вільної торгівлі (ЗВТ) між Україною та Європейським Союзом. Підписання та імплементація Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, що включає положення про поглиблену та всеохоплюючу ЗВТ, вимагають створення ефективного механізму управління, гармонізації національного законодавства з правом ЄС, а також розробки дієвих адміністративних інструментів для забезпечення прозорості та ефективності торгівельних відносин.

Разом із можливостями, які відкриває ЗВТ для українського бізнесу, зростають і виклики, пов'язані з адаптацією правової системи, усуненням адміністративних бар'єрів, удосконаленням процедур контролю та нагляду, а також забезпеченням рівних умов для вітчизняних та європейських суб'єктів господарювання. Недостатня правова визначеність, інституційна слабкість окремих державних органів та недостатній рівень імплементації європейських норм у національне законодавство створюють значні перешкоди на шляху ефективного функціонування ЗВТ.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю комплексного аналізу нормативно-правового регулювання у сфері публічного управління процесами формування ЗВТ між Україною та ЄС, визначення його ключових недоліків і розробки рекомендацій щодо вдосконалення правових та інституційних механізмів регулювання у цій сфері.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Публічне управління процесами формування зони вільної торгівлі між Україною та ЄС є предметом зацікавлення багатьох науковців. Зокрема, варто згадати таких вчених як Бондарчук В. [5], Гнілуша С. [4], Казік Т. [4], Комар Н. [1], Кочергіна О. [2], Сюта С. [3], Уніят А. [1], Ткач Д. [4], Шиманська К. [5] та багато інших. Проте сучасні виклики диктують нові умови для реалізації зовнішньої політики України і особливу роль при цьому відіграє публічне управління процесами формування зони вільної торгівлі між Україною та ЄС. Потреба його покращення в сучасних умовах вимагають глибоких наукових досліджень у зазначеному напрямку.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає в дослідженні особливостей нормативно-правового регулювання у сфері публічного управління процесами формування зони вільної торгівлі між Україною та ЄС.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для ефективного функціонування Зони вільної торгівлі (ЗВТ) між Україною та ЄС було ухвалено та адаптовано низку нормативно-правових актів. Вони регулюють митну політику, технічні стандарти, сертифікацію, торговельні правила та механізми правозастосування.

Процес створення та функціонування ЗВТ між Україною та Європейським Союзом базується на положеннях Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, підписаної у 2014 році, зокрема її розділу IV «Торгівля і питання, пов'язані з торгівлею». Угода передбачає поступове усунення тарифних та нетарифних бар'єрів, гармонізацію митних процедур, а також наближення законодавства України до норм і стандартів ЄС.

Серед основних законодавчих актів України, що регулюють функціонування ЗВТ, можна виділити:

1. Конституція України (1996 р.) [6].
2. Угода про асоціацію між Україною та ЄС (ратифікована у 2014 р.) [7].
3. Митний кодекс України [8], який адаптує національні митні процедури до стандартів ЄС.
4. Закон України «Про зовнішньоекономічну діяльність» [9], що визначає правові засади ведення міжнародної торгівлі.
5. Закон України «Про захист прав споживачів» (редакція 1991 р., з подальшими змінами) [10].
6. Закони та підзаконні акти щодо технічного регулювання, санітарних і фітосанітарних заходів, які мають на меті гармонізацію стандартів із вимогами ЄС.
7. Національна стратегія адаптації законодавства України до права ЄС, яка містить комплексні заходи для приведення українського законодавства у відповідність до європейських норм.

Конституція України є основним правовим документом, що закріплює принципи економічної діяльності держави, міжнародного співробітництва та інтеграції у світову економіку. У статті 9 визначено, що міжнародні

договори, ратифіковані Верховною Радою України, є частиною національного законодавства, що має важливе значення для виконання Угоди про асоціацію з ЄС.

Угода про асоціацію між Україною та ЄС є міжнародно-правовим актом, що визначає умови функціонування ЗВТ між Україною та ЄС. Основні положення Угоди, що стосуються торгівлі, полягають у лібералізації торгівлі товарами та послугами, уніфікації митних процедур відповідно до європейських стандартів, гармонізації технічного регулювання, сертифікації та санітарних і фітосанітарних норм, а також захисту прав інтелектуальної власності та сприяння конкуренції.

Митний кодекс регулює митні процедури та порядок контролю за експортом та імпортом товарів. Основні зміни в межах адаптації до стандартів ЄС, які відобразилися в Митному кодексі, полягають у спрощенні митних процедур для суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності, введенні системи митних декларацій в електронній формі, запровадженні механізму «єдиного вікна» для оформлення вантажів та визначенні митної вартості відповідно до правил СОТ.

Закон України «Про зовнішньоекономічну діяльність» регулює основні принципи здійснення зовнішньоекономічної діяльності, права та обов'язки держави, підприємств і фізичних осіб у міжнародній торгівлі. В межах адаптації до норм ЄС були внесені зміни щодо усунення обмежень на торгівлю окремими видами товарів, ліквідації дискримінаційних положень щодо іноземних інвесторів та впровадження європейських стандартів у сфері ліцензування та сертифікації.

Закон України «Про захист прав споживачів» адаптований до норм ЄС у частині впровадження механізмів відповідальності виробників за якість товарів, запровадження європейських стандартів маркування продукції та надання споживачам можливості отримувати інформацію про товар відповідно до вимог ЄС.

Також варто згадати Закон України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» (2015 р.), який є ключовим у сфері технічного регулювання та встановлює загальні правила щодо оцінки відповідності продукції вимогам ЄС. Його основні положення:

– гармонізація технічних регламентів із європейськими директивами;
– перехід на європейську систему стандартизації (EN, ISO);
– визнання результатів сертифікації українських товарів у ЄС та навпаки.

В рамках ЗВТ слід наголосити на важливості Закону України «Про державний контроль за дотриманням законодавства про безпечність харчових продуктів і кормів» (2017 р.), який було ухвалено в межах виконання зобов'язань щодо санітарних та фітосанітарних заходів (SPS) відповідно до Угоди про асоціацію з ЄС. Основними його положеннями є запровадження контролю за безпечністю харчової продукції на всіх етапах виробництва, створення європейської системи простежуваності продукції (traceability) та гармонізація ветеринарного та фітосанітарного контролю з нормами Євросоюзу.

Схожим по формату є Закон України «Про стандартизацію» (2014 р.), який передбачає поступовий перехід України до європейської системи технічного регулювання. Основні аспекти цього Закону полягають в ліквідації обов'язкової сертифікації в більшості сфер, впровадженні європейських стандартів ISO та EN, а також наданні підприємствам права добровільного вибору стандартів, що відповідають вимогам ринку ЄС.

Насамкінець варто згадати Закон України «Про інвестиційну діяльність» (1991 р., з подальшими змінами), який регулює порядок залучення інвестицій в Україну, включаючи прямі іноземні інвестиції. В межах виконання Угоди про асоціацію були внесені зміни щодо спрощення доступу іноземних компаній до українського ринку, усунення адміністративних бар'єрів для інвесторів з країн ЄС та запровадження механізмів захисту інвестицій та арбітражного врегулювання спорів.

Окрему групу становить законодавство України у сфері конкуренції, яке також зазнало змін у зв'язку з адаптацією до норм Євросоюзу. Основними актами є:

– Закон України «Про захист економічної конкуренції» – встановлює правила ведення конкуренції, забороняє монополістичні змови та недобросовісну конкуренцію.

– Закон України «Про Антимонопольний комітет України» – визначає функції та повноваження органу, відповідального за контроль за конкурентним середовищем.

Отже, реалізація ЗВТ між Україною та ЄС передбачає наявність значної кількості нормативних актів, які забезпечують функціонування інституційного механізму публічного управління у сфері регулювання ЗВТ та участь низки державних органів, зокрема:

– Кабінету Міністрів України, який формує загальну державну політику у сфері зовнішньоекономічних відносин та координує роботу відповідних відомств;

– Міністерства економіки України, що відповідає за реалізацію торговельної політики, моніторинг виконання зобов'язань у межах ЗВТ та переговори з ЄС;

– Державної митної служби України, яка здійснює контроль за імпортом та експортом товарів відповідно до нових стандартів;

– Антимонопольного комітету України, який забезпечує контроль за конкуренцією та недопущенням недобросовісних торговельних практик.

Крім того, у межах виконання Угоди про асоціацію створено Спільний комітет з питань торгівлі, який є платформою для діалогу між Україною та ЄС щодо подальшого вдосконалення механізмів ЗВТ.

Попри позитивні зміни у сфері публічного управління процесами формування ЗВТ, існує низка проблем, що ускладнюють повноцінне функціонування Зони вільної торгівлі:

1) недостатня гармонізація національного законодавства з правом ЄС – деякі норми, зокрема у сфері технічного регулювання та захисту прав споживачів, досі не відповідають європейським вимогам;

2) адміністративні бар'єри та бюрократія – складність митних процедур та сертифікації продукції є перешкодою для діяльності малих і середніх підприємств;

3) недостатня інституційна спроможність – деякі державні органи потребують підвищення ефективності своєї роботи та цифровізації відповідних процесів;

4) проблеми правозастосування – українські суди та контролюючі органи не завжди забезпечують належний рівень правового захисту бізнесу в державі.

Виходячи із викликів, які склалися сьогодні, а також для підвищення ефективності публічного управління у сфері ЗВТ необхідно забезпечити наступні дії:

1) продовжити гармонізацію законодавства із нормами Європейського Союзу у сферах технічного регулювання, стандартів якості та митного адміністрування;

2) спрощувати адміністративні процедури для експортерів та імпортерів, зокрема через цифровізацію митних операцій;

3) посилювати інституційну спроможність державних органів, відповідальних за реалізацію ЗВТ, шляхом навчання фахівців та запровадження сучасних механізмів управління;

4) розвивати механізми правозастосування, зокрема шляхом зміцнення антимонопольного законодавства України та захисту прав підприємців у межах ЗВТ.

Таким чином, подальше вдосконалення нормативно-правового регулювання у сфері публічного управління процесами формування ЗВТ між Україною та ЄС є важливою передумовою інтеграції України до європейського економічного простору та створення сприятливих умов для розвитку вітчизняного бізнесу.

Висновки

Адаптація українського законодавства до європейських норм є необхідною умовою ефективного функціонування Зони вільної торгівлі між Україною та ЄС. Хоча вже зроблено значний поступ у напрямку гармонізації нормативно-правової бази, залишається низка викликів, зокрема в сфері митного адміністрування, сертифікації продукції, захисту конкуренції та інвестиційного клімату. Подальша імплементація європейських норм дозволить підвищити конкурентоспроможність українських товарів і сприяти інтеграції України у спільний ринок ЄС.

Список використаної літератури

1. Комар Н., Уніят А. Регіональні угоди про вільну торгівлю за участю України: можливості та ризики. Економіка та суспільство, (26). 2021. URL: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/367/353 (дата звернення 21.09.2024) https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-26-36

2. Кочергіна О. Ю. Сучасний зміст зони вільної торгівлі як невід'ємної категорії інтеграційного розвитку. Інвестиції: практика та досвід. 2018. Вип. 1. С. 54–58.

3. Сюта С. Зона вільної України з ЄС: наявні результати та перспективи для регіонального торговельного співробітництва. Науковий вісник Одеського національного економічного університету. 2018. № 3. С. 153–165.

4. Ткач Д. І., Казік Т. В., Гнілуша С. І. Порівняльно-правовий аналіз угод про вільну торгівлю з Україною на прикладі ЄС та Канади. Правничий вісник Університету «КРОК», № 35. 2019. С. 89–97.

5. Шиманська К. В., Бондарчук В. В. Ефект Угоди про зону вільної торгівлі між Україною та ЄС на вітчизняний імпорт та експорт. Економіка, управління та адміністрування, № 2(96), 2021. С. 25–30. https://doi.org/10.26642/ema-2021-2(96)-25-30

6. Конституція України, прийнята на п'ятій сесії Верховної Ради України 28 червня 1996 р. // Відомості Верховної Ради України. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр

7. Україна на шляху до ЄС: реалії і перспективи. Національна безпека і оборона. № 1–2. 2022. 131 с.

8. Митний кодекс України від 13 березня 2012 р. // Відомості Верховної Ради України (ВВР). 2012. № 44–45. № 46–47. № 48. Ст. 552.

9. Про зовнішньоекономічну діяльність: Закон України від 16.04.91 No959-XII. URL: http:// www.rada.kiev.ua

10. Про захист прав споживачів: Закон України від 12 травня 1991р. // Відомості Верховної Ради України. 1991. № 30. ст. 379.

References

1. Komar N., Uniyat A. (2021). Rehional′ni uhody pro vil′nu torhivlyu za uchastyu Ukrayiny: mozhlyvosti ta ryzyky [Regional free trade agreements with the participation of Ukraine: opportunities and risks]. *Ekonomika ta suspil'stvo*, (26). Retrieved from: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/ view/367/353 https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-26-36

2. Kocherhina O. YU. (2018). Suchasnyy zmist zony vil′noyi torhivli yak nevid″yemnoyi katehoriyi intehratsiynoho rozvytku [The modern meaning of the free trade zone as an integral category of integration development]. *Investytsiyi: praktyka ta dosvid*. no. 1. pp. 54–58.

3. Syuta S. (2018). Zona vil′noyi Ukrayiny z YES: nayavni rezul′taty ta perspektyvy dlya rehional′noho torhovel′noho spivrobitnytstva [Zone of free Ukraine with the EU: available results and prospects for regional trade cooperation]. *Naukovyy visnyk Odes'koho natsional'noho ekonomichnoho universytetu*. no. 3. pp. 153–165.

4. Tkach D. I., Kazik T. V., Hnilusha S. I. (2019). Porivnyal′no-pravovyy analiz uhod pro vil′nu torhivlyu z Ukrayinoyu na prykladi YES ta Kanady [Comparative legal analysis of free trade agreements with Ukraine on the example of the EU and Canada]. *Pravnychyy visnyk Universytetu "KROK"*. no. 35. pp. 89–97.

5. Shymans′ka K. V., Bondarchuk V. V. (2021). Efekt Uhody pro zonu vil′noyi torhivli mizh Ukrayinoyu ta YES na vitchyznyanyy import ta eksport [The effect of the Agreement on a free trade zone between Ukraine and the EU on domestic imports and exports]. *Ekonomika, upravlinnya ta administruvannya*, no. 2(96). pp. 25–30. https://doi.org/10.26642/ema-2021-2(96)-25-30

6. Konstytutsiya Ukrayiny [Constitution of Ukraine], dated 28.06.1996 // Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny. Retrieved from: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/254k/96-vr

7. Ukrayina na shlyakhu do YES: realiyi i perspektyvy [Ukraine on the path to the EU: realities and prospects]. *Natsional'na bezpeka i oborona*, no. 1–2. 2022. 131 p.

8. Mytnyy kodeks Ukrayiny [Customs Code of Ukraine]: *Law of Ukraine dated* 13.03.2012 // Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny (VVR). 2012, no. 44–45, no. 46–47, no. 48. St. 552.

9. Pro zovnishn′oekonomichnu diyal′nist′ [On Foreign Economic Activity]: *Law of Ukraine dated* 16.04.91, no. 959-XII. Retrieved from: http:// www.rada.kiev.ua

10. Pro zakhyst prav spozhyvachiv [On the Protection of Consumer Rights]: *Law of Ukraine dated* 12.05.1991. // Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrayiny. 1991, no. 30. st.379.

УДК 351.85:78(94) DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.49

Г. І. КАЗАКОВ
кандидат історичних наук,
докторант кафедри публічного управління і проектного менеджменту
ДЗВО «Університет менеджменту освіти»,
провідний професіонал відділу методології навчання та наукових досліджень
Вища школа публічного управління
ORCID: 0000-0002-2860-9892

РОЗВИТОК МУЗИЧНОЇ ІНДУСТРІЇ АВСТРАЛІЇ В КОНТЕКСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОГРАМИ REVIVE

У статті розглянуто державну політику Австралії щодо музичної індустрії, яка реалізується в рамках програми Revive. З урахуванням того, що музична індустрія є одним із провідних секторів культурної економіки країни, вона посідає центральне місце у структурі програми.

Метою дослідження поставлено дослідити державну політику щодо музичної індустрії Австралії в рамках програми Revive.

Автор обґрунтовує важливість музичної індустрії серед усіх культурних індустрій Австралії та важливості її підтримки в постковідний період. Особливу увагу у дослідженні приділено аналізу механізмів державної підтримки музичного сектору, серед яких ключове місце займає жива музика як одна з найбільш постраждалих сфер у період пандемії COVID-19. Описано інституційні новації, зокрема створення Music Australia – спеціалізованого органу, відповідального за координацію зусиль у галузі сучасної музики. Розглянуто основні фінансові інструменти програми Revive, включаючи підпрограму Revive Live, що надає гранти на підтримку концертних майданчиків і музичних фестивалів, а також експортно-орієнтовані грантові програми, які сприяють міжнародній популяризації австралійських виконавців. Наводяться конкретні приклади грантових програм, які реалізовуються в межах Revive. Відзначено прагнення держави забезпечити рівний доступ громадян до культурних продуктів, підтримати інклюзію, залучити приватні інвестиції та активізувати місцеві економіки через культурну децентралізацію.

Досвід Австралії розглядається як приклад зразкової публічної політики в сфері культурних індустрій, яка поєднує культурну цінність, економічну доцільність і стратегічний підхід до формування іміджу країни. На основі вивченого матеріалу запропоновані рекомендації для України щодо створення власної довгострокової стратегії підтримки музичної індустрії.

Ключові слова: *Revive, публічне управління, музична індустрія, культурна політика, державна підтримка, грантова програма, експорт культурного продукту, культурна дипломатія.*

H. I. KAZAKOV
Candidate of Historical Sciences,
Doctoral Student at the Department of Public Administration
and Project Management
State Higher Educational Institution “University of Educational Management”,
Leading Professional at the Department of Teaching Methodology
and Scientific Research
Higher School of Public Administration
ORCID: 0000-0002-2860-9892

DEVELOPMENT OF THE AUSTRALIAN MUSIC INDUSTRY IN THE CONTEXT OF THE IMPLEMENTATION OF THE REVIVE PROGRAM

The article examines the Australian government policy towards the music industry, which is implemented within the framework of the Revive program. Given that the music industry is one of the leading sectors of the country’s cultural economy, it occupies a central place in the structure of the program.

The aim of the study is to examine the government policy towards the Australian music industry within the framework of the Revive program.

The author substantiates the importance of the music industry among all cultural industries in Australia and the importance of its support in the post-COVID period. The study pays special attention to the analysis of mechanisms for state support for the music sector, among which live music occupies a key place as one of the most affected areas during the COVID-19 pandemic. Institutional innovations are described, in particular the creation of Music Australia – a specialized body responsible for coordinating efforts in the field of contemporary music. The main financial instruments of the Revive program are considered, including the Revive Live sub-program, which provides grants to support concert

venues and music festivals, as well as export-oriented grant programs that contribute to the international promotion of Australian performers. Specific examples of grant programs implemented within Revive are given. The state's desire to ensure equal access to cultural products for citizens, support inclusion, attract private investment and activate local economies through cultural decentralization are noted.

The experience of Australia is considered as an example of exemplary public policy in the field of cultural industries, which combines cultural value, economic feasibility and a strategic approach to shaping the image of the country. Based on the studied material, recommendations are proposed for Ukraine to create its own long-term strategy for supporting the music industry.

Key words: *Revive, public administration, music industry, cultural policy, state support, grant program, export of cultural product, cultural diplomacy.*

Постановка проблеми

Пандемія Covid-19 суттєво вплинула на культурні індустрії багатьох держав, адже будучи у більшій мірі орієнтованими на живого споживача, відповідні індустрії, в залежності від країн, втратили до 80 % свого доходу, тим самим суттєво скоротивши і податкові виплати до національних бюджетів. Результатом відповідних втрат стало зростання на рівні окремих держав стимулювання національних культурних індустрій. При цьому, якщо у більшості країн це були одноразові акції, то деякі держави розробили цілеспрямовані багаторічні стратегії державної підтримки культурних індустрій. Однією х таких країн є Австралія, у якій започатковано оновлену програму «Креативна Австралія» («Creative Australia») – Revive, реалізація якої заплановане до 2028 р. Програма Revive реалізується у напрямах музичної, кіно та літературної індустрії, задля їх популяризації, просування на міжнародний ринок та стимулювання їх потенціалу для розвитку національної економіки

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження – дослідити державну політику щодо музичної індустрії Австралії в рамках програми Revive.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз наукового доробку дозволяє засвідчити про низький рівень вивчення публічної політики щодо музичної індустрії, а особливо в контексті реалізації багаторічної програми Revive. Найбільш повне вивчення оновленої культурної політики здійснено Ж. Кауст [4; 5]. Науковиця не лише висвітлює сучасну політику держави щодо культурних індустрій Австралії, але й порівнює її з іншими періодами, робить екскурс в історію поданої політики. Водночас, дослідниця хоча і згадує музичну індустрію, але лише як приклад, не зосереджуючись на ньому. Крізь призму порівняння австралійської та китайської культурної політики, тему досліджено у праці А. Фенна [8]. Водночас, вивчення окресленої тематики сприятиме залученню кращих світових практик у побудову національної культурної політики, зокрема щодо музичної індустрії.

Викладення основного матеріалу дослідження

Оскільки музична індустрія є одним із ключових секторів культурної економіки, її відновлення та розвиток є одним із пріоритетів у межах програми Revive. Уряд Австралії визнає стратегічне значення музики не лише як форми мистецького самовираження, але й як джерела зайнятості населення, джерела національного доходу та як засобу м'якого впливу в міжнародній політиці. Саме тому реалізація програми Revive передбачає системну підтримку музичного сектору. У цьому контексті аналіз напрямів, інструментів і очікуваних результатів реалізації програми Revive у сфері музичної індустрії дозволяє оцінити ефективність державної політики підтримки креативного сектору, як чинника соціально-економічного розвитку країни. А досвід її впровадження дозволить Україні розбудувати власну багаторічну стратегію розвитку музичної індустрії.

Програма Revive є багатовекторною програмою розвитку культурних індустрій Австралії, розробники якої виходять з тези, що потенційний дохід культурних індустрій, складає 17 мільярдів доларів США на рік, а самі індустрії можуть залучити до роботи близько 400 тисяч австралійців (близько 1,8 % населення країни) [13], а за умов реалізації іноземних проєктів тимчасово кількість робочих місць у культурних індустріях може досягати 600–700 тисяч австралійців. В такому випадку інтерес до культурних індустрій з боку органів влади є не дивним, адже вони стимулюють ринок праці в країні та в перспективі (за рахунок виплати податків) можуть надавати бюджету Австралії щорічно дохід більший, ніж вкладається у реалізацію політики Revive (286 млн доларів на 4 року). За рахунок же підвищення експорту культурної продукції, сума доходів може бути ще більшою.

Зважаючи на те, що майже третина доходу від усіх культурних індустрій Австралії (приблизно 5,7 млрд доларів США [6]) генерується музичною індустрією, не дивно, що значна увага в контексті досліджуваної програми приділяється саме їй. Особливо актуальним такий підхід є й тому, що тривалий період офіційного врегулювання та підтримки музичної індустрії не було, як для прикладу з кіноіндустрією. Зокрема, представники уряду наголошують: «Сучасна музика в Австралії надто довго ігнорувалась урядом. Music Australia це змінить. Ми хочемо переконатися, що саундтрек до життя в Австралії містить сучасну австралійську музику для кожного такту» [13].

У програмі пропонується зосередити увагу першочергово на сфері живої музики, яка суттєво постраждала під час пандемії та станом на початок 2025 р. відновити доковідний рівень не вдалося. Проблемними лишаються

питання: зростання вартості організації живих виступів, втрата кваліфікованих кадрів (міграція, перекваліфікація на інші професії під час пандемії; зміна менталітету австралійців, яким стало краще сидіти вдома ніж відвідувати концерти тощо. Подолання цих проблем є одним з пріоритетів для органів влади та уряду в цілому.

Так, 25 березня 2024 р. міністр мистецтв, член парламенту Т. Берк звернувся до Постійного комітету із комунікацій та мистецтв «з проханням провести розслідування та доповісти про виклики та можливості в австралійській індустрії живої музики» [9], зокрема у таких напрямках:

– стійкість і зростання галузі;
– придатність та розташування місць для організаторів, учасників та відвідувачів;
– розвиток митців та зростання їх кар'єри
– розвиток спроможності щодо сприяння та просування подій та фестивалів;
– місцеві економічні переваги;
– гранти та програми підтримки;
– розвиток аудиторії та поведінка споживачів;
– перешкоди для розвитку австралійської промисловості, як усередині країни, так і на міжнародному рівні, включаючи ті, що стосуються експорту;
– створення сталого розвитку в галузі всередині країни та за кордоном [19].

За підсумками вищевказаного моніторингу відбулося виділення 8,6 млн доларів з метою забезпечення підтримки підприємств живої музики, зокрема закладів живої музики та фестивалів сучасної музики [19]. Подані дотації надаються в межах підпрограми Revive Live, створеної задля підтримки закладів живої музики та музичних фестивалів, сприяючи їхньому функціонуванню в сучасних умовах. Основна мета проєкту – мінімізація ризиків закриття закладів і скасування подій, а також забезпечення стійкого розвитку музичної індустрії. Додатково програма спрямована на підвищення доступності музичних заходів, розширення можливостей участі для аудиторії та створення сприятливих умов для професійного розвитку музикантів і працівників музичної сфери, включаючи осіб з обмеженими можливостями [17]. Власне за 2024 р. в рамках проєкту було видано 110 грантів у розмірі від 17 804 (оновлення освітлення та обладнання на майданчику The Y HQ U18s Venue) до 200 тисяч доларів США (обладнання доступності фестивалю Savannah in the Round Festival 2025 для людей з обмеженими можливостями) [16]. Як ми бачимо, в межах Revive Live надається всебічна допомога, яка сприяє розвитку живої музики в країні та відвідуваності заходів з боку австралійців та гостей країни.

Окрім того, відбулося створення Music Australia. Завдяки цим змінам, австралійська музична індустрія має можливість розширити ринок сучасної музики за рахунок інвестицій у створення оригінального контенту, підтримці шкільних програм із написання пісень і звукозапису, розвитку стратегічних партнерств, проведенню досліджень, фінансуванню експортної ініціативи Sounds Australia та укладанню нових спільних інвестиційних угод із регіональними урядами [3].

Наголосимо що Revive Live є не єдиною грантовою програмою в межах Creative Australia. Станом на сьогодні надається значна кількість грантів для підтримки «сучасних австралійських музикантів». У 2023 р. на підтримку музичних ініціатив, особливо майданчиків живої музики було виділено 11,1 млн доларів США. Окремо були профінансовані деякі багаторічні проєкти (станом на 2025 р. таких проєктів 25, кожен тривалістю щонайменше 4 роки) [2, с. 1]. Додатково на різні проєкти було виділено різними міжнародними фондами та приватними ініціативами ще 2,5 млн доларів [2, с. 3].

Зокрема, у 2024 р. було розпочато набір заявок у трьох категоріях на грантову програму Музичний фонд розвитку експорту Австралії – ініціативи спільного фінансування, розроблена для надання фінансової підтримки різноманітним колам австралійських артистів. Реалізації підлягають такі напрями:

1. Міжнародний фонд виступів і гастролей призначений для підтримки міжнародних гастролей і демонстраційної діяльності, із відповідним фінансуванням від 5000 до 25 000 доларів США. Зокрема, фінансова підтримка в межах програми може бути спрямована на покриття таких витрат, як: гонорари артистам і творчим працівникам; витрати на перельоти, проживання, добові та наземний транспорт; туристичне страхування; оформлення віз; перевезення вантажу або багажу; витрати на догляд за дитиною, опікуна та забезпечення доступу; придбання квитків і/або реєстрацію для відвідування заходів, а також заходи, спрямовані на зменшення впливу на навколишнє середовище. Витрати не покривають переліт, не можуть бути витрачені на виступи в Австралії [11].
2. Міжнародний фонд професійного та художнього розвитку спрямований на підтримку ініціатив, пов'язаних із міжнародним професійним зростанням у сфері мистецтва та культури, забезпечуючи фінансування в межах від 3000 до 15 000 доларів США. Програма надає можливості для розвитку творчих і професійних компетенцій шляхом участі у міжнародних заходах, співпраці з іноземними фахівцями та реалізації культурних проєктів на глобальному рівні.

Фінансова підтримка в межах фонду може бути спрямована на участь у співавторських сесіях, що сприяють створенню нових мистецьких проєктів у міжнародному середовищі; запрошення до участі у таборах авторської пісні, де митці можуть розширювати творчі зв'язки та розвивати свою майстерність; покриття витрат на запис

музики за кордоном, включаючи етапи відстеження, зведення та мастерингу; залучення міжнародного продюсера для співпраці в рамках створення нових музичних або художніх проєктів; фінансування міжнародного проживання або стипендій, що дає змогу митцям зосередитися на творчій діяльності в новому середовищі; участь у міжнародних виставках, конференціях, форумах, що сприяють налагодженню зв'язків та інтеграції у світовий мистецький простір; присутність композитора на прем'єрі його твору, створеного на замовлення, що забезпечує його активну участь у презентації власної музики; читання лекцій у закордонних академіях, інститутах чи університетах, що сприяє міжнародному обміну знаннями та досвідом; самокерованих художників, які проводять підтверджені ділові зустрічі для налагодження професійних зв'язків та перспективної співпраці (необхідно надати підтвердження про заплановані зустрічі). Програма сприяє інтеграції митців у міжнародний культурний простір, розширенню їхніх можливостей та розвитку інноваційних підходів у сфері мистецтва [12].

3. Міжнародний фонд розвитку ринку та аудиторії спрямований на підтримку міжнародної реклами та створення контенту, забезпечуючи фінансування від 2000 до 10000 доларів США. Підтримка може бути використана для проведення міжнародних PR- та промо-кампаній; запуску міжнародної радіокампанії; створення музичних відеокліпів, роликів для соцмереж і перекладу пісень для іноземної аудиторії; впровадження глобальної стратегії цифрового маркетингу [10].

Усі три категорії передбачають фінансування у пропорції 50/50 (держава/подавець на грант). Реалізація грантових проєктів має розпочатися між 1 липня 2025 р. та 30 вересня 2025 р. та завершитися протягом 12 місяців.

Хоча в межах грантів передбачено закриття прийому заявок 10 лютого, прийом було дещо раніше через значну кількість заявок. Це свідчить про значний інтерес австралійських музикантів до просування своєї творчості закордоном. Проте варто врахувати, що незначні обсяги фінансування не дозволяють зробити великі тури у Європі, країнах Північної Америки, де австралійська музика теоретично мала б попит.

У 2025 р., проєктом вперше було виділені кошти на фінансування національних організацій, які виховують підростаюче покоління діячів музичної індустрії (і мова йде не лише про музикантів, але і менеджмент, працівників звукозапису тощо) [6].

Також, 20 січня 2025 р. схвалено надання фінансування у сумі у розмірі 1 732 000 доларів США спрямоване на підтримку 23 звукозаписних лейблів, включаючи як місцеві незалежні компанії, так і австралійські філії великих міжнародних лейблів. Ці інвестиції забезпечать створення нових професійних записів, цифрового контенту, мистецьких проєктів, а також підтримку маркетингових та рекламних ініціатив. Крім того, кошти будуть використані на виробництво, логістику, розвиток артистів і персоналу, що сприятиме зміцненню музичної індустрії Австралії [18].

Таким чином, Music Australia активно підтримує музичну індустрію країни, сприяючи її розвитку на всіх етапах та сферах функціонування. Організація активно сприяє створенню та просуванню нових музичних записів, розвитку талантів і підтримці місцевих виконавців, що забезпечує конкурентоспроможність австралійської музики як на внутрішньому, так і на міжнародному ринках. Вона також бере участь у розвитку інфраструктури, необхідної для виробництва та розповсюдження музичних творів, включаючи маркетинг, рекламні кампанії та логістичні процеси.

Проте не лише міжнародному просуванню австралійської музики сприяє Creative Australia. Для прикладу, грант «Програма гастролей сучасної музики», реалізація якого відбувається у 2025 р. передбачає надання від 5 до 50 тисяч доларів США для концертних турів виконавців, які створюють сучасну оригінальну австралійську музику [7]. Під сучасною австралійською музикою розуміється «сукупність музичних творів різних жанрів і піджанрів, створених австралійськими митцями в сучасний період, що проходять процес ліцензування, запису, розповсюдження та презентації у комерційному та некомерційному середовищі, відображаючи актуальні культурні й соціальні реалії країни» [11; 12; 10]. Сума гранту залежить від: кількості населених пунктів (але не менше 3) у турі, їх розмірів та віддаленості. За критерій віддаленості береться місце проживання виконавця [7].

Австралійська державна підтримка музичної індустрії демонструє комплексний підхід до розвитку національної сцени та інтеграції місцевих виконавців у міжнародний ринок. Проте, значний інтерес до грантових програм і їх швидке вичерпання свідчать про високий рівень конкуренції та обмеженість фінансових ресурсів. Це підкреслює необхідність подальшого вдосконалення механізмів підтримки, зокрема збільшення обсягів фінансування, розширення доступу до міжнародних платформ і створення умов для сталого розвитку індустрії. У перспективі ефективна державна політика має не лише зберегти існуючу музичну екосистему, а й перетворити Австралію на потужний центр сучасної музики з глобальним впливом.

В рамках програми Revive, органи влади виступають і за підтримку слухача, створюючи умови для рівного доступу на живі музичні заходи усім бажаючим. Адже, якщо столичні міста сповнені заходів (хоча і мають подеколи занадто високі ціни на квитки), то в регіонах, в свою чергу, кількість подій є обмеженою. В такому випадку, надання субсидій майданчикам, підтримуючи національні тури створюється можливість більшості австралійців познайомитися з музичними продуктами, які створюються у власній державі.

Варто також відзначити, що в межах реалізації нової культурної політики значне місце відводиться просуванню на європейський ринок, у першу чергу за рахунок участі у пісенному конкурсу Євробачення. Австралія

демонструє найвищі показники по перегляду конкурсу поза межами Європи, тому не дивно, що австралійський уряд тривалий час намагався домогтися участі своєї країни. У 2015 р. була погоджена одноразова участь, яка в подальшому була продовжена, за умови що представник європейської спілки радіомовлення і телебачення країни, що приймає Євробачення, запросить Австралію стати учасником [15]. До 2022 р. такі запрошення надавалися щороку з першої участі Австралії, у тому числі й Україною. У 2019 та у 2024 р. було укладено нові контракти, які забезпечили право Австралії приймати участь терміном у 5 років.

Фінансується участь Австралії у Євробаченні за рахунок державних фондів, місцевих бюджетів та приватного капіталу. Для прикладу, у 2023 р. частину витрат на себе взяв уряд Західної Австралії [14], тоді як у 2024 р. Міжнародний фонд мистецтв культурної дипломатії виділив 50 тисяч доларів для участі Австралії [20]. При цьому, хоча державою не перекриваються усі витрати, з боку органів влади здійснюється пошук приватних інвесторів, які б допомогли гідно представити країну на конкурсі.

Висновки

Таким чином, зважаючи на мистецький та економічний потенціал, в межах програми Revive вагому роль посідає музична індустрія. В межах реалізації програми пропонується усебічна підтримка музичної індустрії, проте з акцентом на розвиток сфери живого виконання, адже подана підгалузь з одного боку зазнала найбільших втрат від пандемії, а з іншого – стимулює не лише розвиток музики, але і суміжні галузі, надаючі робочі місця та розвиваючи місцеву економіку. Успішна реалізація ініціатив, зокрема створення окремої інституції Music Australia, запуск підпрограм Revive Live, фондів підтримки міжнародних гастролей, експорту, професійного розвитку та ринку аудиторії, свідчить про продуманий підхід до відновлення та модернізації музичної сфери. Акцент на багаторічних проєктах, підтримці інфраструктури, міжнародних зв'язках та розвитку людського капіталу формує умови для стійкого розвитку індустрії, інтеграції в глобальний ринок і посилення культурного суверенітету країни. Зазначені механізми підтверджують, що стратегічна державна підтримка музичної індустрії може виступати потужним інструментом соціально-економічної трансформації, особливо в умовах посткризового відновлення.

Досвід впровадження та реалізації програми Revive може бути корисним і для України. Виходячи з вище окресленого пропонуємо:

– запровадити багаторічну програму з розвитку культурних індустрій з поділом на окремі культурні індустрії (у 2025 р. прийнята Стратегію розвитку культури в Україні на період до 2030 року, однак вона не містить положень про музичну індустрію);

– створити окремий державний орган або підрозділ (аналог Music Australia), відповідальний за координацію, фінансування та стратегічний розвиток сектору та реалізацію програми;

– запровадити грантові програми різних сфер музичної індустрії;

– акцентувати увагу на просування українського музичного продукту закордоном (у тому числі підтримуючи тури українських артистів);

– розробити стратегію підтримки повноцінного відродження сфери живої музики по завершенню війни.

Список використаної літератури

1. Australia: Western Australia Government Helping to Fund Voyager's Eurovision Participation. URL: https://eurovoix.com/2023/02/27/western-australia-government-voyager-eurovision/ (date access: 21.04.2025).

2. Australia's live music industry. 6 p. URL: https://creative.gov.au/wp-content/uploads/2024/05/21052024_Creative-Australia-submission_Australian-live-music-industry.pdf (date access: 21.04.2025).

3. Australian Contemporary Music Industry Joint Statement – National Cultural Policy. URL: https://air.org.au/2023/02/03/australian-contemporary-music-industry-joint-statement-national-cultural-policy/ (date access: 21.04.2025).

4. Caust J. Art and politics – government and the arts in Australia: a historical and critical analysis. London. New York, Routledge, 2024, 262 p.

5. Caust J. Is 'Revive' a 'game changer' or more of the same? Whose needs are addressed in Australia's new cultural policy and what will change? DOI: https://doi.org/10.1080/10286632.2024.2421304 (date access: 21.04.2025).

6. Chapter 12: Creative industries. URL: https://www.dfat.gov.au/countries-economies-and-regions/southeast-asia/invested-australias-southeast-asia-economic-strategy-2040/chapter-12-creative-industries#_edn1 (date access: 21.04.2025).

7. Contemporary Music Touring Program. URL: https://creative.gov.au/investment-and-development/contemporary-music-touring-program/ (date access: 21.04.2025).

8. Fenna A. The revival of Australian federalism? Trends and developments in Commonwealth–state relations. *Dilemmas in Public Management in Greater China and Australia: Rising Tensions but Common Challenges*. 2023. P. 117–144. URL: https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/92731/92566.pdf?sequence=2&isAllowed=y

9. Inquiry into the challenges and opportunities within the Australian live music industry. URL: https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/House/Communications/Livemusicindustry (date access: 21.04.2025).

10. International Market and Audience Development. URL: https://creative.gov.au/investment-and-development/international-market-and-audience-development/ (date access: 21.04.2025).

11. International Performance and Touring Activity. URL: https://creative.gov.au/investment-and-development/international-performance-and-touring-activity/ (date access: 21.04.2025).

12. International Professional and Artistic Development. URL: https://creative.gov.au/investment-and-development/international-professional-and-artistic-development/ (date access: 21.04.2025).

13. Laying the foundation for a creative Australia. URL: https://minister.infrastructure.gov.au/burke/media-release/laying-foundation-creative-australia (date access: 21.04.2025).

14. Mamma Mia! Australia to represent at Eurovision with help from Government fund. URL: https://www.arts.gov.au/news/mamma-mia-australia-represent-eurovision-help-government-fund (date access: 21.04.2025).

15. On the record: Music Australia releases the inaugural Record Label Development Scheme recipients. URL: https://creative.gov.au/news/media-releases/on-the-record-music-australia-releases-the-inaugural-record-label-development-scheme-recipients/ (date access: 21.04.2025).

16. Revive Live grant recipients – 2024. URL: https://www.arts.gov.au/sites/default/files/documents/revive-live-grant-recipients-2024.pdf (date access: 21.04.2025).

17. Revive Live. URL: https://www.arts.gov.au/funding-and-support/revive-live (date access: 21.04.2025).

18. Strengthening the music industry's core: Music Australia invests over $2 million into contemporary music sector organisations. URL: https://creative.gov.au/news/media-releases/strengthening-the-music-industrys-core-music-australia-invests-over-2-million-into-contemporary-music-sector-organisations/ (date access: 21.04.2025).

19. Terms of Reference. URL: https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/House/Communications/Livemusicindustry/Terms_of_Reference (date access: 21.04.2025).

20. Why is Australia allowed to compete in the Eurovision Song Contest? URL: https://englishexplorations.check.uni-hamburg.de/why-is-australia-allowed-to-compete-in-the-eurovision-song-contest/ (date access: 21.04.2025).

References

1. Australia: Western Australia Government Helping to Fund Voyager's Eurovision Participation (2023). Retrieved from: https://eurovoix.com/2023/02/27/western-australia-government-voyager-eurovision/ [In English].

2. Australia's live music industry (2024). Retrieved from: https://creative.gov.au/wp-content/uploads/2024/05/21052024_Creative-Australia-submission_Australian-live-music-industry.pdf [In English].

3. Australian Contemporary Music Industry Joint Statement – National Cultural Policy (2023). Retrieved from: https://air.org.au/2023/02/03/australian-contemporary-music-industry-joint-statement-national-cultural-policy/ [In English].

4. Caust J. (2024). Art and politics – government and the arts in Australia: a historical and critical analysis. London. New York, Routledge [In English].

5. Caust J. (2024). Is 'Revive' a 'game changer' or more of the same? Whose needs are addressed in Australia's new cultural policy and what will change? DOI: https://doi.org/10.1080/10286632.2024.2421304 [In English].

6. Chapter 12. (n.d.). Creative industries. Retrieved from: https://www.dfat.gov.au/countries-economies-and-regions/southeast-asia/invested-australias-southeast-asia-economic-strategy-2040/chapter-12-creative-industries#_edn1 [In English].

7. Contemporary Music Touring Program (n.d.). Retrieved from: https://creative.gov.au/investment-and-development/contemporary-music-touring-program/ [In English].

8. Fenna A. (2023). The revival of Australian federalism? Trends and developments in Commonwealth–state relations. *Dilemmas in Public Management in Greater China and Australia: Rising Tensions but Common Challenges*, 117–144. Retrieved from: https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/92731/92566.pdf?sequence=2&isAllowed=y [In English].

9. Inquiry into the challenges and opportunities within the Australian live music industry (2024). Retrieved from: https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/House/Communications/Livemusicindustry [In English].

10. International Market and Audience Development (n.d.). Retrieved from: https://creative.gov.au/investment-and-development/international-market-and-audience-development/ [In English].

11. International Performance and Touring Activity (n.d.). Retrieved from: https://creative.gov.au/investment-and-development/international-performance-and-touring-activity/ [In English].

12. International Professional and Artistic Development (n.d.). Retrieved from: https://creative.gov.au/investment-and-development/international-professional-and-artistic-development/ [In English].

13. Laying the foundation for a creative Australia (n.d.). Retrieved from: https://minister.infrastructure.gov.au/burke/media-release/laying-foundation-creative-australia [In English].

14. Mamma Mia! Australia to represent at Eurovision with help from Government fund (2024). Retrieved from: https://www.arts.gov.au/news/mamma-mia-australia-represent-eurovision-help-government-fund [In English].

15. On the record: Music Australia releases the inaugural Record Label Development Scheme recipients (n.d.). Retrieved from: https://creative.gov.au/news/media-releases/on-the-record-music-australia-releases-the-inaugural-record-label-development-scheme-recipients/ [In English].

16. Revive Live grant recipients – 2024. (2025). Retrieved from: https://www.arts.gov.au/sites/default/files/documents/revive-live-grant-recipients-2024.pdf [In English].

17. Revive Live (n.d.). Retrieved from: https://www.arts.gov.au/funding-and-support/revive-live [In English].

18. Strengthening the music industry's core: Music Australia invests over $2 million into contemporary music sector organisations (n.d.). Retrieved from: https://creative.gov.au/news/media-releases/strengthening-the-music-industrys-core-music-australia-invests-over-2-million-into-contemporary-music-sector-organisations/ [In English].

19. Terms of Reference (n.d.). Retrieved from: https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Committees/House/Communications/Livemusicindustry/Terms_of_Reference [In English].

20. Why is Australia allowed to compete in the Eurovision Song Contest? (2019). Retrieved from: https://englishexplorations.check.uni-hamburg.de/why-is-australia-allowed-to-compete-in-the-eurovision-song-contest/ [In English].

UDC 332.1:004.738.5:351.746.1(477) DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.50

O. M. OLIINYK
Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor
Zaporizhzhia National University
ORCID: 0000-0003-0511-7681

ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE OF GOVERNMENT REGULATION OF DIGITAL TRANSFORMATION IN REGIONAL DEVELOPMENT THE FOOD INDUSTRY IN UKRAINE

Based on the conducted research, the architecture of digital transformation in Ukraine's regional and sectoral dimensions was systematically analyzed, refined, and conceptually expanded. This enabled the development of a multi-level, polycentric model of digital change, integrated into management reforms and the strategic renewal of regulatory practices in the food industry. The study presents an original view of digital transformation as a complex socio-technical process that goes beyond implementing individual IT solutions and unfolds through dynamic interactions among institutions, infrastructure, services, governance practices, and civic initiatives. Researched the typology of regions by digital capacity allowed revealed asymmetries, highlighting the need for adaptive tools and context-sensitive digitalization models. Considered the transformation of digital development indicators shows a shift in focus from technical parameters to civic engagement and service efficiency, fostering open regulation with institutional feedback. Mechanisms of digital regulatory intervention in the food industry have been deepened through CDTO projects, push monitoring, digital cabinets, self-control e-platforms, and smart contract logistics, forming an intellectualized field of interaction between the state and the market. It has been demonstrated that digital mechanisms reshape the logic of governance-from a supervisory model to a proactive, partnership-based, algorithmic, and decentralized system. It has also been established that a key development area will be the institutionalization of experimental space through sandbox solutions, mobile control modules, and real-time API integration-laying the groundwork for a modular, predictive, and interactive governance model. Thus, a comprehensive foundation for the digital transformation of food industry regulation has been formed, combining infrastructure modernization, regulatory innovation, service inclusiveness, and institutional adaptation, ensuring a transition to a new philosophy of state presence smart, trustworthy, and synchronized with the challenges of the digital society.

Key words: *digital transformation, public services, current state of digitization of regions, food industry, public services in the food industry.*

О. М. ОЛІЙНИК
кандидат філософських наук, доцент
Запорізький національний університет
ORCID: 0000-0003-0511-7681

ОЦІНКА ПОТОЧНОГО СТАНУ ДЕРЖАВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ В УКРАЇНІ

За результатами проведеного дослідження було системно проаналізовано, уточнено та концептуально розширено архітектуру цифрової трансформації в регіональному й галузевому вимірах України. Це дозволило сформувати багаторівневу поліцентричну модель цифрових змін, інтегровану в управлінські реформи й стратегічне оновлення регуляторних практик у харчовій промисловості. Представлено авторське бачення цифрової трансформації як складного соціотехнічного процесу, що не зводиться до ІТ-рішень, а розгортається через динамічну взаємодію інституцій, інфраструктури, сервісів, управлінських практик і громадських ініціатив. Досліджена типологізація регіонів за цифровою спроможністю, дозволила виявити асиметрії, що зумовлює потребу в адаптивних інструментах і контекстно-чутливих моделях цифровізації. Розглянута трансформація індикаторного апарату цифрового розвитку демонструє зсув акценту з технічних параметрів на участь громад та сервісну ефективність, сприяючи відкритому регулюванню зі зворотним зв'язком. Поглиблено механізми цифрового регуляторного втручання в харчовій промисловості через CDTO-проєкти, push-моніторинг, цифрові кабінети, е-платформи самоконтролю та смарт-контрактна логістика, яка створює інтелектуалізоване поле взаємодії між державою та ринком. Доведено, що цифрові механізми змінюють логіку управління починаючи від наглядової моделі до проактивної, партнерської, алгоритмізованої та децентралізованої системи. Встановлено, що ключовим напрямом стане інституціоналізація експериментального простору через sandbox-рішення, мобільні модулі контролю й API-інтеграцію, що закладатимуть основи для модульної, прогнозної та інтерактивної моделі управління. Таким чином, сформована цілісна основа цифрової трансформації регулювання харчової галузі, яка поєднує інфраструктурну модернізацію, нормативну інноваційність, сервісну інклюзивність та інституційну адаптацію, забезпечить перехід до нової розумної, довірчої та синхронізованої з викликами цифрового суспільства філософії державної присутності.

Ключові слова: *цифрова трансформація, державні послуги, поточний стан цифровізації регіонів, харчова галузь, державні послуги у харчовій галузі.*

Problem statement

In the context of the dynamic digitalization of the global economy, the effectiveness of state regulation of Ukraine's food industry increasingly depends on the level of digital maturity within regional public service systems. Insufficient regional digitalization hampers access to regulatory services, reduces the transparency of food supply chains, exacerbates territorial inequality, and slows integration into international markets where electronic services are the standard for interaction. Without the development of internet infrastructure, electronic registries, digital administrative service centers, and open data, it is impossible to ensure modern, transparent, and efficient regulation in the food sector. This creates a vicious cycle in which weak digital foundations in the regions undermine the state's ability to conduct quality oversight, which in turn reduces the competitiveness of the food industry and hinders its growth. Therefore, the digital transformation of regional governance is a critical prerequisite for modernizing state regulation of Ukraine's food sector.

Analysis of the latest research and publication

Scientific works of domestic experts form a holistic vision of digital transformation in Ukraine, allowing the generalization of approaches and problems and enabling the transition to the assessment of state regulation of digitalization of regional development and the food industry. Nechaeva I., Shylovets I. [1] proved that the digitalization of regions is inevitable but constrained by bureaucracy, lack of personnel, funding, and low public awareness, while the unevenness of digitalization can be overcome through cooperation with the EU and strengthening the digital autonomy of communities. Dubyna M., Dergaliuk M. [2] emphasized the need to update the regulatory framework and international partnerships to coordinate actions between the center and regions. Kizliar O. [3] focused on the integration of innovations into urban management, where obstacles include the lack of infrastructure, resources, and legal regulation. Lysenko R. [4] highlighted the importance of ethical and legal aspects in digital public services, while Khomyshyn I. [5] demonstrated that digitalization enhances transparency and trust in the state. Krakowska A., Babyk M. [6] showed the limited access to e-services due to procedural and legal shortcomings, which necessitates the improvement of infrastructure and regulatory support. Yanenkova I. [7] proved that robotics and artificial intelligence can stimulate the economy under proper regulation. Karkovska V., Dziurakh Yu. [8] highlighted the importance of digitalization of the food industry to increase competitiveness, product quality, and optimize production. Thus, digital transformation in Ukraine is cross-sectoral, and among the main challenges the following were identified: a deficit of regulatory maturity, weak coordination, and limited resources. This justifies the need to assess the state of state regulation of digitalization of regional development and the food industry, based on the reports of the Ministry of Digital Transformation of Ukraine for 2022–2024 [9, 10, 11].

Formulation of the research objective

The purpose of this study is to assess the impact of the level of digital transformation of regional governance on the effectiveness of state regulation of Ukraine's food industry and to develop practical recommendations for improving the regulatory and organizational mechanisms of the sector by integrating modern digital tools and services. The objectives of this research are as follows: to analyze the current state of digital transformation of regional development in Ukraine; to evaluate the dynamics and regional disparities in the digital capacity of Ukraine's regions based on analytical and statistical indicators; to determine the relationship between the level of regional digitalization and the effectiveness of state regulation of the food industry; to identify the main barriers and factors hindering the integration of digital technologies into state regulatory mechanisms of the food sector; and to formulate directions and mechanisms for improving state regulation of the food industry.

Summary of the main material

In the context of rapid digitalization of the global economy and the growing volumes of electronic and fast commerce, there arises a need to rethink the institutional foundations of state regulation of the food sector. The transformation of consumer practices, the evolution of logistics, and the intensification of the digital environment necessitate a shift from classical paradigms to adaptive, dynamically integrated management models. However, an analysis of current policy reveals a gap between the pace of market changes and the capacity of institutions to respond in a timely manner. A systematic comparison of traditional control mechanisms with the needs of the digital economy shows that instruments created for offline production and physical trade are becoming increasingly ineffective under the conditions of e-commerce, with instantaneous transactions, multi-level supply chains, and the absence of physical contact with goods. This creates institutional asymmetry, which requires not only adaptation of legislation but also a deep reconsideration of its underlying logic. Therefore, the analysis of regulation should comprehensively cover the normative and organizational-procedural components, the institutional capacity of controlling bodies, the level of digitalization of administrative procedures, and the integration of real-time data while ensuring transparency, traceability, and consumer safety. It is advisable to analyze the current state of digital transformation in Ukraine, as outlined in the analytical and statistical documents of the «Ministry of Digital Transformation: Digital Transformation Index of the Regions of Ukraine» for the period from 2022 to 2024 [9, 10, 11], across the following regions: Dnipropetrovsk, Ternopil, Odesa, Poltava, Lviv, Rivne,

Vinnytsia, Zakarpattia, Volyn, Cherkasy, Zhytomyr, Ivano-Frankivsk, Khmelnytskyi, Kyiv, Kharkiv, Chernihiv, Kherson, Donetsk, Kirovohrad, Mykolaiv, Luhansk, Zaporizhzhia, Sumy, Chernivtsi. The following categories and subcategories were defined as general parameters of digital transformation: 1. Development of institutional capacity; 2. Development of the Internet; 3. Development of service provision centers; 4. Development of a paperless regime; 5. Development of digital education for individuals and legal entities; 6. Development of the region's digital identity; 7. Penetration of basic e-services; 8. Development of sectoral digital transformation; Implementation of individual CDTO projects (since 2024). However, in our opinion, the following categories were analyzed separately as the most significant for the development of digital transformation of the food sector: 1. Development of institutional capacity; 2. Development of the Internet; 3. Development of a paperless regime; 4. Development of sectoral digital transformation.

Thus, as the next step, we will consider the already calculated analytical-statistical component of the development of institutional capacity in the context of digital transformation across the regions of Ukraine [9, 10, 11], see Table 1.

Table 1

Development of institutional capacity in the context of digital transformation across the regions of Ukraine in the period from 2022 to 2024

№	Name region	Index 2022	Index 2023	Index 2024
1	2	3	4	5
1	Dnipropetrovsk	1,000	1,000	0,897
2	Ternopil	1,000	1,000	0,851
3	Odessa	0,900	1,000	0,853
4	Poltava	0,800	0,800	0,937
5	Lviv	0,890	0,880	0,854
6	Rivne	1,000	0,960	0,854
7	Vinnytsia	0,900	0,900	0,802
8	Zakarpattia	0,571	0,800	0,901
9	Volyn	0,600	0,880	0,603
10	Cherkasy	0,744	0,656	0,483
11	Zhytomyr	0,380	0,380	0,183
12	Ivano-Frankivsk	0,810	0,900	0,790
13	Khmelnytskyi	0,861	0,800	0,781
14	Kyiv	0,710	0,685	0,733
15	Kharkiv	0,794	0,728	0,491
16	Chernihiv	0,493	0,612	0,726
17	Kherson	0,441	0,286	0,781
18	Donetsk	0,325	0,320	0,341
19	Kirovohrad	0,213	0,320	0,503
20	Mykolaiv	0,110	0,167	0,327
21	Luhansk	0,093	0	0
22	Zaporizhzhia	0,331	0,598	0,625
23	Sumy	0,440	0,300	0,714
24	Chernivtsi	0,370	0,500	0,726

Source: compiled by the author based on [1, 2, 3, 9, 10, 11]

In the current conditions of digital transformation of the regional management system, the ability of local institutions to promptly implement digital approaches and effectively utilize the latest management tools is of particular relevance. Table 1 presents the comparative indices of institutional capacity of the regions of Ukraine for the years 2022–2024 in the context of digital transformation. This allows tracking the dynamics of development at the regional level, assessing the effectiveness of management strategies, the ability to undergo structural changes, and the role of local digital initiatives [4, 5]. Since 2022, five key indicators have been used to assess the institutional capacity of regions: A1 – "Regional development strategy"; A2 – "Availability of a regional informatization program"; A3 – "Creation of a digital transformation structural unit"; A4 – "Auxiliary non-staff organizations at regional state administrations (RSA)"; A5 – "Digital communities" (introduced in 2024). In 2022–2023, the dominant indicators were A2 (weight – 0.4), A3 (weight – 0.3), A4 (weight – 0.2), which indicates the dominance of an organizational-institutional approach. From 2024, the emphasis shifted to decentralized digital participation: indicator A5 was introduced (weight – 0.15), the weight of A3 was reduced to 0.25, A4 – to 0.1, which means the focus of assessment shifted from the RSA level to the community level, revealing structural unevenness between regions. The leaders were Dnipropetrovsk (+0.073), Ternopil (+0.071), and Odesa (+0.071) regions, thanks to systemic IT programs, established digital transformation units, and effective interaction with non-staff organizations. In 2024, they successfully integrated communities into digital processes, maintaining leadership.

At the same time, Chernihiv (+0.022), Kherson (+0.034), Luhansk (+0.012), and Chernivtsi (+0.015) regions proved less prepared for new challenges, where despite the overall growth of indices, the weakness of digital communities restrained their progress. Zhytomyr region demonstrates consistent digitalization (with an increase in the overall index from 0.710 in 2022 to 0.903 in 2024), initially through institution formation and subsequently through community engagement. A similar stability is indicated by Vinnytsia region (+0.113). However, Kharkiv region serves as an example of high adaptability, especially after a decline in 2023 (0.728); in 2024, the index rose to 0.931, indicating rapid mobilization at the local level. In contrast, Zaporizhzhia region (+0.164), although it improved its indicators (to 0.654), overall remains at a low level due to the lack of institutional support for digital initiatives.

Thus, in 2024, the decisive factor in the digital capacity of regions became community activity. Regions that combined strategic planning, organizational foundations, and digital engagement at the local level (Dnipropetrovsk, Odesa, Zhytomyr, Kharkiv, Vinnytsia) became examples of effective digital governance that meets the contemporary challenges of transformation.

Let us consider the analytical-statistical component of internet development in the context of digital transformation across the regions of Ukraine, see Table 2.

Table 2

Internet development in the context of digital transformation across the regions of Ukraine in the period from 2022 to 2024

№	Name region	Index 2022	Index 2023	Index 2024
1	2	3	4	5
1	Dnipropetrovsk	0,993	0,902	0,790
2	Ternopil	0,992	0,916	0,708
3	Odessa	0,841	0,849	0,876
4	Poltava	0,894	0,917	0,964
5	Lviv	0,833	0,914	0,766
6	Rivne	0,907	0,609	0,798
7	Vinnytsia	0,743	0,784	0,708
8	Zakarpattia	0,868	0,602	0,806
9	Volyn	0,733	0,870	0,722
10	Cherkasy	0,771	0,595	0,634
11	Zhytomyr	0,909	0,769	0,732
12	Ivano-Frankivsk	0,896	0,769	0,674
13	Khmelnytskyi	0,609	0,756	0,726
14	Kyiv	0,377	0,689	0,782
15	Kharkiv	0,615	0,926	0,514
16	Chernihiv	0,612	0,404	0,684
17	Kherson	0,428	0,179	0,352
18	Donetsk	0,325	0,118	0,174
19	Kirovohrad	0,388	0,619	0,438
20	Mykolaiv	0,530	0,609	0,680
21	Luhansk	0,100	0	0
22	Zaporizhzhia	0,404	0,185	0,462
23	Sumy	0,471	0,173	0,812
24	Chernivtsi	0,479	0,374	0,982

Source: compiled by the author based on [1, 2, 3, 9, 10, 11]

As can be seen from Table 2, the analysis of internet infrastructure development across Ukraine regions for 2022–2024 makes it possible to assess not only the effectiveness of state program's implementation but also the depth of digital changes at the local level [4]. The presented indicators – A6 ("Internet subsidies" 2021–2022), A7 ("Internet and WI-FI in shelters"), A8 ("Access to infrastructure"), A9 ("Open WI-FI zones in public institutions") – significantly influenced the index structure, which changed during the analyzed period. In 2022, A6 (weight – 0.5) and A7 (weight – 0.4) dominated, ensuring high scores for regions with strong telecom infrastructure: Dnipropetrovsk (0.993), Ternopil (0.992), Zhytomyr (0.909), Ivano-Frankivsk (0.896). In 2023, the removal of A6, the increase in A7 weight to 0.9, and the temporary inclusion of A8 (weight – 0.1) shifted the focus, which led to growth in Poltava (+0.023), Odesa (+0.008), Volyn (+0.137), and at the same time, significant declines in Cherkasy (–0.176), Kyiv (–0.045), Chernihiv (–0.208), Kherson (–0.076). In 2024, the index was entirely based on A9 (weight – 1), radically changing the country's digital map. The leader became Chernivtsi region (growth from 0.374 to 0.982), with notable results also in Odesa (+0.027), Poltava (+0.047), Lviv (+0.052), Rivne (+0.189), Khmelnytskyi (+0.060). Meanwhile, previous year's leaders – Ternopil (–0.208), Dnipropetrovsk (–0.112),

Zhytomyr (–0.171) – were unable to adapt to the new requirements. A particularly sharp decline occurred in Kharkiv region (–0.412), explained by security factors and the reallocation of digital resources. A similar dynamic was observed in Kyiv region (after growth in 2023 and recovery only to 0.658 in 2024). Thus, from 2024 onwards, the main criterion for digital efficiency became the availability of open WI-FI in public institutions, shifting the focus from security and infrastructure priorities to the real accessibility of digital services. This became a catalyst for the reassessment of regional digital readiness and revealed new leaders among which were Chernivtsi, Poltava, and Odesa regions. The strengthening of A9 role indicated a transition from external modernization to internal digital inclusion as the basis for sustainable transformation.

Let us consider the analytical and statistical component of the development of the «paperless» regime in the context of digital transformation across the regions of Ukraine, see Table 3.

Table 3

The development of the "paperless" regime in the context of digital transformation across the regions of Ukraine in the period from 2022 to 2024

№	Name region	Index 2022	Index 2023	Index 2024
1	2	3	4	5
1	Dnipropetrovsk	0,952	0,923	0,752
2	Ternopil	0,933	0,856	0,683
3	Odessa	0,958	0,819	0,537
4	Poltava	0,967	0,902	0,763
5	Lviv	0,924	0,951	0,777
6	Rivne	0,891	0,853	0,390
7	Vinnytsia	0,894	0,868	0,427
8	Zakarpattia	0,850	0,813	0,451
9	Volyn	0,928	0,865	0,674
10	Cherkasy	0,803	0,731	0,252
11	Zhytomyr	0,859	0,743	0,248
12	Ivano-Frankivsk	0,162	0,599	0,301
13	Khmelnytskyi	0,653	0,667	0,439
14	Kyiv	0,711	0,718	0,426
15	Kharkiv	0,553	0,809	0,543
16	Chernihiv	0,596	0,536	0,568
17	Kherson	0,693	0,612	0,203
18	Donetsk	0,527	0,605	0,172
19	Kirovohrad	0,531	0,622	0,134
20	Mykolaiv	0,497	0,487	0,237
21	Luhansk	0,459	0	0
22	Zaporizhzhia	0,063	0,141	0,078
23	Sumy	0,569	0,182	0,229
24	Chernivtsi	0,390	0,740	0,328

Source: compiled by the author based on [1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11]

As shown in Table 3, within the framework of public administration digitalization and the implementation of a "paperless" regime, the regions of Ukraine demonstrate varying dynamics in adapting to digital standards. The analysis of indices for 2022–2024 reveals both national trends and regional specificities. The change in indicator weightings a decrease in the significance of A19. "E-document management" (from 0.7 in 2022 to 0.3 in 2024), A20. "Diia.QR/sharing" (from 0.2 to 0.05), an increase in the weight of A21. "Registry digitalization" (from 0.1 to 0.4), and the introduction of A22. "Open data" (0.25) – indicates a shift toward deeper infrastructural digitalization. The leading regions remain Dnipropetrovsk, Poltava, and Lviv regions, which have ensured a systematic approach and flexible adaptation to new indicators, maintaining high performance (from 0.752 to 0.778). Their stability is based on a combination of strong e-document management in previous years and a rapid transition to open data and geoportals. In contrast, Odesa, Ternopil, and Volyn regions, which previously had high scores, lost ground (for example, Odesa from 0.958 to 0.537), failing to integrate new elements of digital transformation in time. The reason lies in the limitations of previous approaches focused solely on document management. The trajectory of Sumy region is noteworthy a drop in 2023 to 0.182, followed by an increase to 0.277 in 2024 indicating the beginning of a digital ecosystem restructuring. In Chernivtsi region, a sharp jump was recorded in 2023 (up to 0.740), but by 2024 the index fell to 0.328, indicating instability in the digital infrastructure. Zhytomyr and Vinnytsia regions show consistently positive dynamics (with Zhytomyr rising from 0.859 to 0.903). Kharkiv region stands out in particular despite a decline in 2022, it achieved the highest score in 2024 at 0.931,

reflecting high adaptability and a transition to data-centric governance. At the same time, Kirovohrad (decline from 0.531 to 0.134) and Zaporizhzhia (sharp fluctuations from 0.063 to 0.654 and back to 0.078) regions demonstrate a fragmented digital policy and a lack of strategy for transitioning to a new digital model. Thus, the change in the index structure in 2024 revealed significant disparities in the digital maturity of the regions. Only those regions that invested in sustainable digital institutions and ensured flexibility and transparency in governance managed not only to retain but also to improve their positions [4, 5, 6]. Today, digital competitiveness is defined not only by technology but primarily by the level of strategic thinking, institutional interaction, and orientation toward openness.

Let us examine the analytical and statistical component of sectoral digital transformation development in the context of digital transformation across the regions of Ukraine, see Table 4.

Table 4

Development of sectoral digital transformation across the regions of Ukraine in the period from 2022 to 2024

№	Name region	Index 2022	Index 2023	Index 2024
1	2	3	4	5
1	Dnipropetrovsk	0,924	0,826	0,882
2	Ternopil	0,999	0,773	0,792
3	Odessa	0,808	0,601	0,523
4	Poltava	0,560	0,836	0,694
5	Lviv	0,820	0,918	0,964
6	Rivne	0,573	0,732	0,465
7	Vinnytsia	0,721	0,848	0,652
8	Zakarpattia	0,504	0,688	0,327
9	Volyn	0,716	0,747	0,710
10	Cherkasy	0,387	0,719	0,311
11	Zhytomyr	0,403	0,569	0,327
12	Ivano-Frankivsk	0,338	0,690	0,357
13	Khmelnytskyi	0,458	0,637	0,393
14	Kyiv	0,210	0,534	0,431
15	Kharkiv	0,325	0,773	0,553
16	Chernihiv	0,507	0,509	0,536
17	Kherson	0,066	0,092	0,407
18	Donetsk	0,475	0,272	0,297
19	Kirovohrad	0,154	0,454	0,359
20	Mykolaiv	0,300	0,105	0,292
21	Luhansk	0,224	0	0
22	Zaporizhzhia	0,261	0,065	0,243
23	Sumy	0,321	0,104	0,407
24	Chernivtsi	0,211	0,447	0,402

Source: compiled by the author based on [1, 2, 3, 9, 10, 11]

The data in Table 4 reflect the shift in digital priorities during 2022–2024, which influenced both the overall dynamics and the positions of individual regions. A key factor was the change in weighting coefficients in the evaluation system. For example, indicator A.36 “Cybersecurity of Information” with a weight of 0.5 in 2022 was reformatted in 2024 to “Information Protection and Critical Infrastructure Resilience” with a weight of 0.3, indicating a shift in focus from technical protection to more comprehensive digital risk management. Also, indicator A.37 “Cybersecurity Policy” (weight – 0.3) was completely removed, affecting the index scores of regions that had emphasized this component. Similarly, the exclusion of indicator A.38 “E-permit” (weight – 0.1) in 2023 reduced the role of e-governance in the overall index. Meanwhile, new indicators such as “Civil Protection” (weight – 0.3) and “Healthcare” (weight – 0.25) reflect a transition toward socially oriented digital policies. These changes directly impacted the regional rankings. Dnipropetrovsk region decreased from 0.924 in 2022 to 0.826 in 2023 but demonstrated adaptability in 2024, raising its index to 0.882. Lviv region, which had a high score in 2022 (0.821), reached 0.918 in 2023 but declined to 0.902 in 2024 due to insufficient adaptation to new requirements. Ternopil region lost value in 2023 (0.773) after reaching 0.999 in 2022, but partially recovered in 2024 (0.792). Vinnytsia, on the other hand, increased its score to 0.848 in 2023 but fell to 0.652 in 2024, indicating challenges in implementing digital civil protection. Among the regions with negative dynamics was Cherkasy region, which declined from 0.719 in 2023 to 0.311 in 2024, demonstrating a loss of digital transformation priorities. Odesa region consistently lost ground (from 0.808 in 2022 to 0.523 in 2024), indicating weak implementation of digital management components. In Poltava region, there was growth to 0.836 in 2023, followed by a decline to 0.694 in 2024 due to a mismatch between service development and the evaluation structure. Positive

dynamics are characteristic of Kyiv region (from 0.412 in 2022, 0.534 in 2023 to 0.625 in 2024), demonstrating consistent integration of new indicators into the digital strategy. Similarly, in Chernihiv region, gradual growth (from 0.507 in 2022, 0.509 in 2023 to 0.553 in 2024) indicates strengthening of digital initiatives. Overall, in 2024, there is a reorientation of digital transformation evaluation due to the reduced role of cybersecurity and e-governance, offset by a focus on social directions such as population protection, medical services, food safety, and critical infrastructure resilience. This allowed some regions to enhance their capabilities, while others suffered due to the low flexibility of their digital strategies. The best-adapted regions were Dnipropetrovsk, Lviv, and Kyiv. The most significant index declines were seen in Cherkasy, Odesa, and Poltava. Thus, high results now depend not only on the availability of digital services but also on the ability to quickly integrate new priorities and ensure a connection between governance and citizens.

Thus, an analysis of digital transformation categories indicates that against the backdrop of growing electronic and rapid commerce, the key role is played by the development of institutional capacity, which transforms the model of public administration from reactive to proactive, creating new forms of digital administration through risk management in the food supply chain, digital registry management centers, optimization of oversight coordination, and analytical preventive supervision [7, 8]. Adaptive inspection planning and digital audits increase the speed and accuracy of response. This approach allows for a paradigm shift in state regulation from oversight to analytical partnership. The development of the "internet" will become not only an infrastructure but also a regulatory factor, as it underpins platforms for quality control, remote monitoring services, and geospatial cluster monitoring systems. The state gains the ability to interact interactively with businesses, reducing communication costs. Constant access to registries, push notifications, virtual laboratories, and digital transformation of rural areas strengthen regulatory infrastructure. The development of "digital service delivery centers" will redirect the logic of interaction through: digital registration of food industry operators, electronic certification, consulting, foreign economic activity support, by integrating into unified portals with automatic statuses, service monitoring, and continuous feedback. Service centers are transforming from formal intermediaries into regulatory links. The "paperless" mode enables dynamic supply chain administration through e-lading with quality labeling, integration with cash registers, smart contracts, digital archives, HACCP reporting, standards validation, and remote document verification, supporting self-control mechanisms instead of external pressure. The development of the "Digital Education" category will encompass both individuals and legal entities, from e-courses for farmers to testing systems for inspectors, forming a digital environment for professional renewal, while digital readiness certification platforms with reliability ratings will turn the state into a knowledge curator. The development of the "Regional business cards" category for the food industry is strategically important through online catalogs, safety ratings, quality maps, sustainability indicators, and e-promotion tools that build trust, support exports, and shift the focus from control to promotion of verified producers. The development of basic e-services categories will create the foundation for sustainable digital regulation through a single operator portal, online licensing, digital sanitary control approval, APIs, and automatic requirement updates. Thus, the state will be able to transition to a digital management cycle where all actions are accompanied by algorithms that ensure real-time compliance with standards. Traceability systems will make logistics transparent, especially for fast delivery. The development of the "Sectoral transformation" category will focus on centralized data platforms, integration of IoT sensors, launch of AI-based risk analytics, digital self-regulation protocols, and a new format of state-business interaction that is intelligent, continuous, and predictable. Additional development of digital laboratories, collective analysis, and testing of standards will reduce burdens and improve state regulation in the food sector. The development of "CDTO projects" will open the possibility of targeted regulation through local sandboxes, labeling, mobile apps, forecasting systems, and e-commerce impact assessments, enabling flexible scenarios that lower innovation barriers. Thus, the digital regulator will become a moderator of experiments, not a limiter. In conclusion, each researched category of digital transformation shapes nine areas of modernization in the regulatory field, enabling a shift from an administrative model to a flexible digital system of trust, transparency, adaptability, and participation.

Considering the narrower current state of government registries, namely the "Diia guide to public services", the following digital transformation services in the field of public services for the food industry were identified (digitized and non-digitized) [12]: Issuance of an operating permit online (status – not digitized, operates manually); Renewal of an operating permit for a market operator engaged in the production and/or storage of food of animal origin (status – not digitized, operates manually); State registration of market operator facilities (status – digitized, operates digitally); Amendment of data in the State register of market operator facilities (status – not digitized, operates manually); Entry of information about the cessation of use of facilities into the State register of market operator facilities (status – digitized, operates digitally); Provision of services for consumer rights protection in case of receipt of low-quality goods (status – not digitized, operates manually); State registration of genetically modified organisms used in food products, feed, feed additives, and veterinary drugs (status – not digitized, operates manually); Revocation of operating permits for market operators engaged in the production and/or storage of food of animal origin (status – not digitized, operates manually); Implementation of the TRACES NT system of electronic international veterinary certificates. For example, when a veterinary certificate for export to France is issued to a producer, the competent authority in the partner country already sees the data: who is exporting, where, and who will receive the goods. Similarly, Ukraine sees this data when food is imported into the country.

Let us consider digital transformation services (projects) in the field of public services for the food industry that have been temporarily suspended due to the full-scale invasion or are currently under development: State registration of market operator facilities; Digitization of phytosanitary services and ePhyto processes involves online application submission for cargo clearance, document processing analytics, prevention of document forgery during export; reduction of international notifications due to incorrect phytosanitary certificate processing; real-time cargo movement control; electronic phytosanitary certificate exchange with trade partners to prevent customs delays in the importing country; Creation of a unified digital food safety system (HACCP), the system of state audits by the State Service of Ukraine on Food safety and consumer protection, obtaining international certification (DSTU) ISO 22000; The «e-Buyer» portal is currently at the design and regulatory preparation stage, but its implementation is officially postponed until 2027 or the end of martial law in Ukraine. This state project is conceived as a key digital tool for a transparent and safe e-commerce environment and strengthening institutional consumer rights protection online. The strategic goal is to create a mechanism for digital seller identification, mandatory registration of all online trade entities, access to verified information about them, and feedback channels with oversight bodies. According to the concept, online stores and other entities would be required to register on the portal within ten days of starting their activity, undergo digital identification, and obtain a «verified seller» status – a marker of integrity displayed on websites and marketplaces. The platform would also include electronic offices for sellers and consumers to file complaints, track appeals, receive responses, and evaluate service quality. The portal's analytical system would conduct monitoring, detect systemic violations, and promote standardization of service quality.

Conclusions

Based on the statistical analysis of the state of digitalization of Ukraine's regions from 2022 to 2024, it was concluded that each of the examined categories of digital transformation ranging from institutional reforms to infrastructural solutions, from educational and communication tools to innovative sandbox projects will contribute to shaping a coherent vector for transforming the philosophy of state regulation in the food industry. This transformation will aim to build a flexible, transparent, analytical, and inclusive model grounded in digital trust, registration accuracy, institutional adaptability, and principles of co-participation among the state, businesses, and consumers.

Bibliography

1. Нечаєва І., Шиловець І. Цифрова трансформація регіонів України: проблеми, рекомендації, перспективи. *Acta Academiae Beregsasiensis*. 2024. № 6. С. 137–145. DOI: https://doi.org/10.58423/2786-6742/2024-6-137-145 (дата звернення: 12.05.2025).

2. Дубина М. Особливості цифрової трансформації регіонів України: сучасні реалії, проблеми та шляхи вирішення. *ECONOMIC SYNERGY*. 2023. № 1(7). С. 66–81. DOI: https://doi.org/10.53920/ES-2023-1-6 (дата звернення: 12.05.2025).

3. Кізляр О. Цифрова трансформація регіонів України як передумова реалізації концепції «розумного міста». *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2024. № 332 (4). С. 457–464. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-332-69 (дата звернення: 12.05.2025).

4. Лисенко Р. Вплив цифрової трансформації на надання публічних послуг. Збірник наукових праць студентів, аспірантів та молодих вчених. «*Публічна політика, врядування та комунікація в Україні*». 2023. С. 36–41.

5. Хомишин І. Напрями цифрової трансформації у публічній сфері: правові засади. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Право. 2022. № 9. С. 233–239. DOI: https://doi.org/10.23939/law2022.35.233 (дата звернення: 12.05.2025).

6. Краковська А., Бабик М. Цифровізація адміністративних послуг в Україні: проблеми та перспективи розвитку. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*. 2022. № 70. DOI: https://doi.org/10.24144/2307-3322.2022.70.52 (дата звернення: 12.05.2025).

7. Яненкова І. Цифрова трансформація української промисловості: ключові акценти. *Проблеми економіки*. 2017. № 4. С. 179–184.

8. Карковська В., Дзюрах Ю. Цифрова трансформація харчової промисловості: управлінський аспект. *Журнал «Наукові інновації та передові технології»*. 2023. № 4(18). DOI: https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-4(18)-66-78 (дата звернення: 12.05.2025).

9. Індекс цифрової трансформації регіонів України. Міністерство цифрової трансформації України. Звіт за 2022 рік. URL: https://surl.li/bqladg (дата звернення: 12.05.2025).

10. Індекс цифрової трансформації регіонів України. Міністерство цифрової трансформації України. Звіт за 2023 рік. URL: https://surl.li/nvwctc (дата звернення: 12.05.2025).

11. Індекс цифрової трансформації регіонів України. Міністерство цифрової трансформації України. Звіт за 2024 рік. URL: https://surli.cc/liopxu (дата звернення: 12.05.2025).

12. Гід з державних послуг «Дія». https://guide.diia.gov.ua (дата звернення: 12.05.2025).

References

1. Nechaeva I., Shylovets I. (2024). Digital transformation of the regions of ukraine: problems, recommendations, prospects. *Acta Academiae Beregsasiensis. Economics*. vol. 6. P. 137–145. DOI: https://doi.org/10.58423/2786-6742/2024-6-137-145 (date of access: 12.05.2025).

2. Dubyna M. (2023). Features of digital transformation of the regions of ukraine: current realities, problems and solutions. *ECONOMIC SYNERGY*. vol. 1 (7). P. 66–81. DOI: https://doi.org/10.53920/ES-2023-1-6 (date of access: 12.05.2025).

3. Kizlyar O. (2024). Digital transformation of the regions of ukraine as a prerequisite for the implementation of the smart city concept. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*. Vol. 332 (4). P. 457–464. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-332-69 (date of access: 12.05.2025).

4. Lysenko R. (2023). The impact of digital transformation on the provision of public services. collection of scientific papers of students, postgraduates and young scientists. "*Public Policy, Governance and Communication in Ukraine*". P. 36–41.

5. Khomyshyn I. (2022). Directions of digital transformation in the public sphere: legal frameworks. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Law*. Vol. 9. P. 233–239. DOI: https://doi.org/10.23939/law2022.35.233 (date of access: 12.05.2025).

6. Krakowska A., Babyk M. (2022). Digitalization of administrative services in ukraine: problems and development prospects. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. Series: Law*. vol. 70. DOI: https://doi.org/10.24144/2307-3322.2022.70.52 (date of access: 12.05.2025).

7. Yanenkova I. (2017). Digital transformation of ukrainian industry: key accents. *Problems of Economy*. vol. 4. P. 179–184.

8. Karkovska V., Dzyurakh Y. (2023). Digital transformation of the food industry: management aspect. *Journal "Scientific Innovations and Advanced Technologies"*. vol. 4 (18). DOI: https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-4(18)-66-78 (date of access: 12.05.2025).

9. Digital transformation index of the regions of Ukraine. Ministry of digital transformation of Ukraine. 2022 Report. Available at: https://surl.li/bqladg (date of access: 12.05.2025).

10. Digital transformation index of the regions of Ukraine. Ministry of digital transformation of Ukraine. 2023 Report. Available at: https://surl.li/nvwctc (date of access: 12.05.2025).

11. Digital transformation index of the regions of Ukraine. Ministry of digital transformation of Ukraine. 2024 Report. Available at: https://surli.cc/liopxu (date of access: 12.05.2025).

12. Guide to public services «Diia». Available at: https://guide.diia.gov.ua (date of access: 12.05.2025).

УДК 342.951 (477) DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.51

В. Д. ФІЛІППОВА
доктор наук з державного управління, професор,
в.о. завідувача кафедри державного управління і місцевого самоврядування
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-8476-3341

І. П. ЛОПУШИНСЬКИЙ
доктор наук з державного управління, професор,
заслужений працівник освіти України,
завідувач кафедри публічного управління та адміністрування
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-7460-7476

В. І. КЛЮЦЕВСЬКИЙ
кандидат наук з державного управління, доцент, заступник голови
Херсонська обласна державна (військова) адміністрація,
доцент кафедри публічного управління та адміністрування (за сумісництвом)
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-5568-9162

РЕФОРМУВАННЯ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ВИКОНАВЧОЇ ВЛАДИ В УКРАЇНІ: НОВІ ЗАКОНОДАВЧІ ІНІЦІАТИВИ

У статті на основі аналізу останніх наукових досліджень з питань реформування територіальної організації виконавчої влади в Україні, чинного законодавства та проєктів нормативно-правових актів розглядаються перспективи запровадження в нашій державі місцевих державних адміністрацій префектурного типу; з'ясовано, що проблематика діяльності виконавчої влади в Україні постійно перебуває в полі зору науковців, насамперед правників та фахівців з державного управління, які ретельно дослідили сутність, зміст та форми виконавчої влади, розглянули співвідношення понять «державне управління» та «виконавча влада», взаємовідносини інститутів Президента та виконавчої влади тощо; показано, що процес здійснення спроб реформування виконавчої влади триває вже понад десять років, починаючи від 2014 року, упродовж яких були намагання внести зміни до Конституції України щодо децентралізації влади, ухвалити закон про префектів тощо; обґрунтовано потребу якнайскорішого ухвалення законопроєкту про місцеві державні адміністрації в новій редакції як відповідь на виконання індикатора Ради Європи «Набрання чинності законодавством щодо реформування територіальної організації виконавчої влади в Україні» реформа «Просування реформи децентралізації» розділу «Децентралізація та регіональна політика», передбаченого Планом для Ukraine Facility 2024–2027; доведено, що запровадження нового законодавства щодо місцевих державних адміністрацій дасть можливість продовжити другий етап реформи місцевого самоврядування та територіальної організації влади (внесення змін до Конституції України), чим уніфікує і приведе повноваження місцевих державних адміністрацій відповідно до Основного Закону, а також сформує систему органів державної влади із забезпечення законності в діяльності органів та посадових осіб місцевого самоврядування, забезпечивши тим самим реалізацію панування в нашій державі принципу верховенства права.

Ключові слова: *держава, Конституція України, законодавство, державне управління, територія, регіональна політика, децентралізація державної влади, організація виконавчої влади, публічна влада, місцеві державні адміністрації, місцеве самоврядування, органи місцевого самоврядування, реформування місцевого самоврядування, законність діяльності органів місцевого самоврядування.*

V. D. FILIPPOVA
Doctor of Science in Public Administration, Professor,
Acting Head of the Department of Public Administration
and Local Self-Government
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-8476-3341

I. P. LOPUSHYNSKYI
Doctor of Science in Public Administration, Professor,
Honored Worker of Education of Ukraine,
Head of the Department of Public Management and Administration
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-7460-7476

V. I. KLYUTSEVSKY
Candidate of Sciences in Public Administration, Associate Professor, Deputy Head
Kherson Regional State (Military) Administration,
Associate Professor at the Department of Public Management and Administration (part-time)
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-5568-9162

REFORMING THE TERRITORIAL ORGANIZATION OF THE EXECUTIVE AUTHORITY IN UKRAINE: NEW LEGISLATIVE INITIATIVES

The article, based on an analysis of recent scientific research on the reform of the territorial organization of executive power in Ukraine, current legislation and draft regulatory legal acts, examines the prospects for introducing prefectural-type local state administrations in our country; It was found that the issues of the activities of the executive branch in Ukraine are constantly in the field of view of scientists, primarily lawyers and public administration specialists, who have carefully studied the essence, content and forms of the executive branch, considered the relationship between the concepts of "public administration" and "executive branch", the relationship between the institutions of the President and the executive branch, etc.; It is shown that the process of attempting to reform the executive branch has been ongoing for over ten years, starting in 2014, during which there have been attempts to amend the Constitution of Ukraine regarding the decentralization of power, adopt a law on the prefect, etc.; the need for the earliest possible adoption of the draft law on local state administrations in a new version is justified as a response to the implementation of the Council of Europe indicator "Entry into force of legislation on the reform of the territorial organization of the executive branch in Ukraine" reform "Promoting the decentralization reform" of the section "Decentralization and regional policy" provided for by the Plan for the Ukraine Facility 2024–2027; it is proven that the introduction of new legislation on local state administrations will make it possible to continue the second stage of the reform of local self-government and territorial organization of power (amendments to the Constitution of Ukraine), thereby unifying and bringing the powers of local state administrations in accordance with the Fundamental Law, and will also form a system of state authorities to ensure legality in the activities of local government bodies and officials, thereby ensuring the implementation of the rule of law in our state.

Key words: *state, Constitution of Ukraine, legislation, public administration, territory, regional policy, decentralization of state power, organization of executive power, public authority, local state administrations, local self-government, local self-government bodies, reform of local self-government, legality of the activities of local self-government bodies.*

Постановка проблеми

З метою реалізації Концепції реформування місцевого самоврядування та територіальної організації влади в Україні, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 1 квітня 2014 року № 333-р [25] ще 01 липня 2015 року Президент України вніс до Верховної Ради України законопроєкт за № 2217а «Про внесення змін до Конституції України (щодо децентралізації влади)» [22], 26 серпня 2015 року та згодом 13 грудня 2019 року у Верховній Раді України було зареєстровано законопроєкти «Про префектів» [23; 24], що так і не були ухвалені й не набули чинності. Неухвалення закону про префекта поснювалося тим, що парламенту України на межі зміни президентів (2019) так і не вдалося розглянути проєкт Закону [22], хоча його й було внесено до порядку денного пленарних засідань Верховної Ради Украни 07 лютого 2019 року за № 2679-VIII [22]. Окрім того, 02 червня 2016 року парламентом України було внесено зміни до Конституції України (щодо правосуддя), якими позбавлено органи системи прокуратури повноважень щодо здійснення загального нагляду за дотриманням законності на рівні місцевого самоврядування в Україні.

Обґрунтування потреби ухвалення законопроєкту про місцеві державні адміністрації в новій редакції було передбачено також нагальною потребою виконання ще в 1 кварталі 2025 року індикатора «Набрання чинності законодавством щодо реформування територіальної організації виконавчої влади в Україні» реформа «Просування реформи децентралізації» розділу «Децентралізація та регіональна політика», передбаченого Планом для Ukraine Facility 2024–2027. Цей індикатор передбачає, що Закон України «Про внесення змін до Закону України «Про місцеві державні адміністрації» та деяких інших законодавчих актів України щодо реформування територіальної організації виконавчої влади в Україні» має бути прийнято та набрати чинності впродовж 12 місяців від дня припинення або скасування воєнного стану в Україні, підзаконні нормативно-правові акти для імплементації цього Закону України має бути прийнято після набрання ним чинності. Закон України зосереджується на переформатуванні місцевих державних адміністрацій в органи префектурного типу з метою організації домірної системи забезпечення законності в діяльності органів місцевого самоврядування, забезпечення координації територіальних органів центральних органів виконавчої влади при реалізації державної політики на місцях. Таким чином, потреба ухвалення закону про місцеві державні адміністрації префектурного типу є очевидною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом до проблеми територіальної організації виконавчої влади в Україні зверталися Д. Артемчук (розглядає поняття та форми організації виконавчої влади) [1], І. Бородін (досліджує виконавчу владу в теорії

поділу влад) [2], Є. Гетьман (вивчає сутність та зміст виконавчої влади [5] та співвідношення понять «виконавча влада» та «державне управління» [6], Д. Голосніченко, І. Ярош (аналізують державний режим та виконавчу владу [7], П. Діхтієвський (досліджує співвідношення, тенденції сучасного розвитку державного управління та виконавчої влади) [8], С. Дубогрій, Г. Костенко-Костейчук (описують виконавча владу України як об'єкт контролю за дотриманням прав і законних інтересів громадян [9], Є. Жилін (розглядає значення та сутність виконавчої влади в Україні) [10], Я. Журавель (досліджує концепт «виконавча влада» у сучасному політико-управлінському дискурсі) [11], Н. Задирака (вивчає співвідношення понять «державне управління» та «виконавча влада») [12], Л. Калініченко (описує повноваження Глави держави, парламенту та виконавчої влади як інститутів контролю за реалізацією конституційних прав, свобод та обов'язків людини і громадянина в Україні) [14], Р. Мартинюк (вивчає співвідношення інститутів «президент» і «виконавча влада» в практиці існування сучасних республік [16], П. Нагорний (розглядає «доктринальне визначення поняття «виконавча влада» в контексті реформування органів виконавчої влади України на регіональному рівні [17], В. Папуша (досліджує місце та роль виконавчої влади в системі державної влади) [18], А. Присяжнюк (описує виконавчу владу як об'єкт державного контролю) [19], І. Процюк (вивчає виконавчу владу в парламентських державах [26], С. Стеценко (досліджує виконавчу владу та роль Конституції України в організації її діяльності [27], О. Хоменко (описує виконавчу владу за умов парламентської республіки та монархії (парламентської демократії) [28] та виконавчу владу за умов президентської республіки) [29], О. Чернишевич (досліджує правовий та історичний аспект виконавчої влади в Україні на рубежі XX–XXI століть) [30], Т. Шаповал (досліджує конституційний аспект інститутів «Президент України» «виконавча влада» [31] та ін. Водночас, ці публікації написано впродовж 2011–2021 років, вони не відбивають останніх законодавчих новацій щодо перспектив запровадження в Україні місцевих державних адміністрацій префектурного типу.

Постановка завдання

Саме тому нашим завданням стало висвітлення перебігу розгляду та ухвалення Закону України «Про місцеві державні адміністрації» [20] префектурного типу та перспектив набуття ним чинності після скасування або припинення в нашій державі правового режиму воєнного стану.

Викладення основного матеріалу дослідження

Реформа місцевого самоврядування та територіальної організації влади (децентралізація влади), розпочата в активній стадії 2014 року, є однією із найбільш успішних трансформацій системи публічного врядування в історії сучасної Україні, що набуло яскравого підтвердження в ході широкомасштабного вторгнення російського війська на суверенну територію України, яке триває вже понад три роки.

На початку 2020 року розпочався другий етап реформи, у результаті якого 12 червня 2020 року Кабінетом Міністрів України було затверджено оновлений адміністративно-територіальний устрій України базового рівня (утворено 1469 спроможних територіальних громад, а також в Україні функціонує територіальна громада столиці України – міста Київ, що має особливий конституційно-правовий статус).

На основі зазначеного, 17 липня 2020 року Верховна Рада України, реалізувавши виключні конституційні повноваження, ухвалила Постанову № 807-IX «Про утворення та ліквідацію районів», чим реорганізувала адміністративно-територіальний устрій субрегіонального рівня та утворила 136 укрупнених районів, що стали основою для організації та діяльності органів державної влади на місцях.

У той же час вищезазначене зумовлює потребу в наділенні районних державних адміністрацій належною юридичною правоздатністю, яка відповідала б актуальному стану суспільно-політичного дискурсу щодо ролі і місця місцевих державних адміністрацій в ієрархії органів виконавчої влади держави, а також поточним викликам та нетиповим проблемам, які органічно виникають під час реалізації державної політики на місцях.

Окрім того, після внесення 2 червня 2016 року змін до Конституції України (щодо правосуддя) та позбавлення органів системи прокуратури в Україні функцій (повноважень) щодо здійснення загального нагляду за дотриманням законності, у правовій системі України утворився вакуум, коли відсутній належний правоможний суб'єкт – представник державної влади, який би через закон був уповноважений від імені та в інтересах держави, на виконання частини другої статті 144 Конституції України, звертатися до суду в разі виявлення невідповідності актів органів і посадових осіб місцевого самоврядування нормам Конституції України та законам України. Отже, як видно, реформа місцевих державних адміністрацій (МДА) є однією із ключових не лише в плані децентралізації, але й європейської інтеграції України.

Зважаючи на це, ще 30 жовтня 2020 року народні депутати України IX скликання В. Безгін та ін. внесли до Верховної Ради України проєкт Закону № 4298 «Про внесення змін до Закону України «Про місцеві державні адміністрації» та деяких інших законодавчих актів України щодо реформування територіальної організації виконавчої влади в Україні» [20].

Ухвалення законопроєкту № 4298 [20] є частиною зобов'язань України перед європейськими партнерами в межах програми Ukraine Facility. Ідеться насамперед про державний нагляд за законністю дій і рішень органів місцевого самоврядування. «Законопроєкт № 4298 [20] є надзвичайно важливим у контексті європейської

інтеграції України та є важливою частиною кластеру Fundamentals в аспекті організації державного урядування в розділі організація та підзвітність. Запроваджений нагляд буде ретельно перевірятися на якість Європейською Комісією, щоб оцінити готовність України до європейської інтеграції.

Саме тому метою ухвалення законопроєкту [20] є створення правових передумов та основ для функціонування МДА префектурного типу до внесення відповідних змін до Конституції України (щодо децентралізації влади) та приведення законодавства про МДА відповідно до сучасних викликів, що постають перед посадовими особами обласних та районних державних адміністрацій під час виконання конституційних повноважень у межах відповідних районів та областей, а також реалізація конституційних положень щодо функціонування системи забезпечення законності під час здійснення органами та посадовими особами місцевого самоврядування своєї діяльності з метою збалансування системи стримування і противаг у частині дотримання Конституції України та законів України всіма суб'єктами публічної влади в державі [20].

Попри важливість та реальну потребу запровадження державного нагляду за місцевим самоврядуванням, євроінтеграційний законопроєкт № 4298 [20], що має розпочати перший етап реформи, був майже на п'ять років «завис» у стінах парламенту між реєстрацією (2020), першим (2021) і другим читанням (досі не пройшло). Проте вже в лютому 2024 року Комітет з питань організації державної влади повернувся до розгляду цього законопроєкту [20] після тривалої паузи та вже навіть був рекомендував його до другого читання.

Водночас, представники ОМС висловили певні занепокоєння щодо ймовірної обтяжливості та зловживання контролем з боку наглядового органу по відношенню до них, оскільки будь-яка демократична система передбачає систему інструментів стримувань і противаг. На їхню думку, запровадження нагляду має стати одним із базових інструментів цієї системи. Громади чи не суголосно вбачають в окремих нормах проєкту Закону [20] глибинні ризики, що ставлять під загрозу самі засади децентралізації й місцевого самоврядування як основи демократії та європейського вибору України. Як зазначають чільні представники ОМС, важливо, щоб у тексті Закону було дотримано принцип балансу, щоб самоврядні функції ОМС не було порушено, але з іншого боку – було здійснено нагляд за діяльністю місцевого самоврядування.

Так, 20 березня 2025 року на позачергових зборах Асоціації міст України представники громад звернулися до Голови Верховної Ради України та народних депутатів з проханням не ухвалювати законопроєкт № 4298 [20]. Аналогічні збори відбувалися і на місцевому рівні. Зокрема, депутати міських рад та голови територіальних громад Івано-Франківської області на своїх зборах 21 березня 2025 року, а депутати Івано-Франківської міської ради на позачерговій сесії, що відбулася 24 березня 2025 року, також висловилися проти ухвалення законопроєкту № 4298 [20] у його поточному вигляді. На їхню думку, дія однієї із норм (ідеться про надання повноважень районним та обласним державним (військовим) адміністраціям зупиняти рішення органів місцевого самоврядування без ухвали суду – *авт.*) може призвести до згортання децентралізації й посилить залежність органів місцевого самоврядування від рішень центральної влади.

У той же час відбулося засідання Правління Українська асоціація районних та обласних рад (УАРОР). Члени Правління, підтримавши в цілому законопроєкт № 4298 [20], водночас дійшли порозуміння щодо відкликання правки про надання головам місцевих державних адміністрацій права призупиняти акти органів місцевого самоврядування без рішення суду. Завдяки конструктивному діалогу УАРОР з народним депутатом В. Безгіним, який очолює підкомітет з питань адміністративно-територіального устрою та місцевого самоврядування Комітету Верховної Ради України з питань організації державної влади, місцевого самоврядування, регіонального розвитку та містобудування, удалося врегулювати це питання. Відкликання правки було принциповою позицією УАРОР.

Крім того, Асоціація міст України звернула увагу Комітету Верховної Ради України з питань організації державної влади, місцевого самоврядування, регіонального розвитку та містобудування, що проєкт Закону України [20] в редакції від 28 січня 2024 року (об'єднання в місцевих державних адміністраціях функцій контролю, галузевого регулювання, управління майном, погодження керівників, нагляду за органами місцевого самоврядування та ін.) суперечить положенням частин третьої і четвертої статті 4, частин другої і третьої статті 8 Європейської хартії місцевого самоврядування та потребує суттєвого доопрацювання [13].

Не дуже втішний висновок було отримано й від Ради Європи, де, попри відзначення певного прогресу, наголошують на потребі створити нову редакцію законопроєкту, що більшою мірою відповідатиме Європейській хартії місцевого самоврядування та євроінтеграції. Зокрема, рекомендується утриматися від надання державним адміністраціям повноважень нагляду до внесення змін до Конституції (тобто другого етапу реформи МДА). У такому разі є ризик отримати дисбаланс влади, коли повноваження адміністрацій будуть непропорційно широкими, і «роздуті» МДА можуть стати основою для використання адмінресурсу, особливо в повоєнний виборчий період [3; 4].

Після справедливої критики законопроєкт [20] повернули на доопрацювання, і до реального розгляду повернулися лише в лютому 2024 року, вже в умовах повномасштабної російсько-української війни та активного утворення військових адміністрацій. До цього спірні моменти законопроєкту активно пропрацьовували на зустрічах з експертами в «страсбурзькому форматі» [4].

Особлива увага в оновленому проєкті Закону [20] надається призначенню голів місцевих державних адміністрацій, які зрештою будуть саме державними службовцями. Окремо в новому проєкті [20] прописано створення кадрового резерву державних службовців, яких спеціально готуватимуть для посад голів МДА. Крім того, буде оновлено й порядок призначення голів МДА. Кандидати беруть участь у конкурсі, який проводить єдина комісія (для голів ОДА, у складі комісії присутні представники асоціацій ОМС). Кандидатури переможців комісія направляє Прем'єр-міністру. Прем'єр-міністр формує список кандидатів та виносить його на розгляд Кабінету Міністрів України. Уряд, своєю чергою, передає список (за нормою законопроєкту – не менше трьох осіб) Президенту України. До списку мають увійти переможці конкурсу та кандидати з кадрового резерву. Президент призначає голову МДА або запускає нову процедуру. Граничний строк перебування голови МДА в одній адміністративно-територіальній одиниці – три роки (запроваджується ротація) [4].

Також у Документі прописано алгоритм дії державного нагляду з боку голів МДА, що виглядає таким чином: МДА ідентифікує правопорушення, після чого органам місцевого самоврядування висувається вимога усунути його в 30-денний термін. Якщо вимога не виконується, МДА звертається до суду. Водночас, варто зауважити, що наглядові повноваження голів МДА законодавці пропонують не запроваджувати до закінчення правового режиму воєнного стану (наразі триває до 9 травня 2025 року), коли військові адміністрації мають повернутися до цивільного формату роботи.

Як планується, законопроєкт № 4298 [20] мав би бути ухваленим парламентом України в першому кварталі 2025 року, проте цього, на жаль не сталося. До того часу парламентарі намагалися, проте безрезультатно, сформулювати збалансований текст для голосування, щоб, з одного боку, не порушити самоврядні функції місцевого самоврядування, а з іншого, – забезпечити здійснення нагляду. Народний депутат України, голова підкомітету з питань адміністративно-територіального устрою та місцевого самоврядування Комітету Верховної Ради України з питань організації державної влади, місцевого самоврядування, регіонального розвитку та містобудування Віталій Безгін (один із авторів проєкту Закону – *авт*.) запевнив: «Законопроєкт № 4298 [20] вже не є предметом обговорень, це вже предмет зобов'язань перед європейськими партнерами. Це наш борг, який ми повинні закрити в рамках переговорного процесу» [15], проте парламентарі вчасно не встигли цього зробити.

Водночас у парламенті з'явився новий законопроєкт «Про внесення змін до Закону України «Про місцеві державні адміністрації» та деяких інших законодавчих актів України щодо реформування територіальної організації виконавчої влади в Україні, який зареєструвала група народних депутатів на чолі з П. Фроловим за № 13124 від 20 березня 2025 року [21].

Як ідеться у пояснювальній записці до законопроєкту [21], його метою є «створення правових основ для переформатування місцевих державних адміністрацій в органи префектурного типу з метою організації домірної системи забезпечення законності в діяльності органів місцевого самоврядування, забезпечення координації територіальних органів центральних органів виконавчої влади при реалізації державної політики на місцях з урахуванням положень Конституції України» [21]. Цей законопроєкт вже публічно підтримала Асоціація міст України.

Автори законопроєкту [21] нагадують, що ухвалення такого закону у першому кварталі 2025 року є індикатором виконання плану Ukraine Facility 2024–2027 і зазначають, що «законопроєкт спрямований виключно на виконання вказаного індикатору, передбачає вдосконалення наявним норм, а не повний перегляд Закону України «Про місцеві державні адміністрації», не містить суперечливих для місцевого самоврядування норм, не втручається у питання призначення та звільнення голів місцевих державних адміністрацій» [21].

Висновки

Отже, ухвалення законопроєкту [20] або спільного закону з проєктом [21] дозволить продовжити другий етап реформи місцевого самоврядування та територіальної організації влади, чим уніфікує і приведе повноваження місцевих державних адміністрацій відповідно до Конституції України, а також сформує систему органів державної влади із забезпечення законності в діяльності органів та посадових осіб місцевого самоврядування, забезпечивши реалізацію панування принципу верховенства права, гарантованого статтею 8 Конституції України, на території 1469 територіальних громад, 136 районів, 24 областей, міста Києва та Севастополя, а також Автономної Республіки Крим. Важливо також запровадити м'яку модель нагляду за ОМС задля побудови партнерських відносин між органами місцевого самоврядування та органами державної виконавчої влади на місцях. Ухвалення законопроєкту № 4298 [20] або його нового варіанту (шляхом поєднання двох проєктів закону) має вирішальне значення для закріплення результатів децентралізаційної реформи, запропоновані законопроєкти пропонують новий механізм відбору та призначення на посади керівництва місцевих державних адміністрацій. Це, безумовно, системні зміни для формування більш демократичного та прозорого інституту представництва держави на місцях. Водночас, на засіданні Комітету державної влади, місцевого самоврядування, регіонального розвитку та містобудування Верховної Ради України, що відбулося 21 березня 2025 року, питання щодо ухвалення Закону [20] було знято з розгляду «для подальших консультацій». Таке рішення Комітету Верховної Ради України підтримали й Асоціація міст України та Всеукраїнська асоціація громад. Головне, щоб ці консультації не тривали досить довго і не пустили ухвалення закону про місцеві державні адміністрації префектурного типу по «новому»,

десятилітньому колу. Маємо зважати й на те, що конституційні повноваження Верховної Ради України закінчилися, і в суспільстві все частіше лунають пропозиції про проведення чергових виборів народних депутатів України. Саме така ситуація (фактична відсутність часу для розгляду законопроєктів) й може знову «загальмувати» ухвалення закону про місцеві державні адміністрації, а відповідно – і початок другого етапу реформування місцевих державних адміністрацій (внесення змін до Конституції України щодо децентралізації влади).

Список використаної літератури

1. Артемчук Д. О. Виконавча влада: поняття і форми організації. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету. Серія : Юриспруденція*, 2015. Вип. 13 (1). С. 53-55. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvmgu_jur_2015_13(1)__14 (дата звернення: 29.03.2025).
2. Бородін І. Л. Виконавча влада в теорії поділу влад. *Юридичний вісник. Повітряне і космічне право*, 2019. № 4. С. 41–47. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnau_2019_4_8 (дата звернення: 29.03.2025).
3. Висновок щодо проєкту Закону «Про внесення змін до Закону України «Про місцеві державні адміністрації» та деяких інших законодавчих актів України щодо реформування територіальної організації виконавчої влади в Україні» (#4298) м. Страсбург, 21 лютого 2024 року CEGG/LEX(2024)1. URL: https://rm.coe.int/cegg-lex-2024-1-local-state-administrations-draft-law-4298-as-of-21-fe/1680aea85f (дата звернення: 29.03.2025).
4. Влада втретє взялася за законопроєкт 4298. URL: https://www.chesno.org/post/5923/ (дата звернення: 29.03.2025).
5. Гетьман Є. А. Виконавча влада: сутність та зміст. *Актуальні проблеми права: теорія і практика*, 2013. № 26. С. 235–241. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/app_2013_26_33 (дата звернення: 29.03.2025).
6. Гетьман Є. А. Виконавча влада та державне управління: співвідношення понять. *Проблеми законності*, 2013. Вип. 122. С. 24–30. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pz_2013_122_5 (дата звернення: 29.03.2025).
7. Голосніченко Д. І., Ярок І. С. Державний режим та виконавча влада. *Юридична Україна*, 2020. № 6. С. 6–12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/urykr_2020_6_3 (дата звернеення: 29.03.2025).
8. Діхтієвський П. В. Державне управління і виконавча влада: співвідношення, тенденції сучасного розвитку. *Юридичний вісник. Повітряне і космічне право*, 2011. № 1. С. 42–45. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnau_2011_1_11 (дата звернення: 29.03.2025).
9. Дубогрій С. В., Костенко-Костейчук Г. А. Виконавча влада України як об'єкт контролю за дотриманням прав і законних інтересів громадян. *Трипільська цивілізація*, 2012. № 8. С. 53–57. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Trcyv_2012_8_13 (дата звернення: 29.03.2025).
10. Жилін Є. В. Виконавча влада в Україні: значення та сутність. *Форум права*, 2013. № 3. С. 208–213. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/FP_index (дата звернення: 29.03.2025).
11. Журавель Я. В. Концепт «виконавча влада» у сучасному політико-управлінському дискурсі. *Юридичний бюлетень*, 2019. Вип. 11(1). С. 281–286. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ub_2019_11(1)__38 (дата звернення: 29.03.2025).
12. Задирака Н. Державне управління та виконавча влада: співвідношення понять. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Юридичні науки*, 2011. Вип. 89. С. 41–43. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU_Yur_2011_89_12 (дата звернення: 29.03.2025).
13. Законопроєкт 4298 (про місцеві держадміністрації) суперечить Європейській хартії місцевого самоврядування. URL: https://auc.org.ua/novyna/zakonoproyekt-4298-pro-miscevi-derzhadministraciyi-superechyt-yevropeyskiy-hartiyi-miscevogo (дата звернення: 29.03.2025).
14. Калініченко Л. Ф. Глава держави, парламент та виконавча влада як інститути контролю за реалізацією конституційних прав, свобод та обов'язків людини і громадянина в Україні. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Серія : Юридичні науки*, 2017. № 3. С. 56–60. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnjiu_2017_3_12 (дата звернення: 29.03.2025).
15. Ключовий законопроєкт № 4298: чи готові місцеві громади до нових правил нагляду? Результати круглого столу «Нагляд за законністю рішень органів місцевого самоврядування: хто має здійснювати і яким чином», 14 жовтня 2024 року. URL: https://rpr.org.ua/news/kliuchovyy-zakonoproiekt-4298-chy-hotovi-mistsevi-hromady-do-novykh-pravyl-nahliadu/ (дата звернення: 29.03.2025).
16. Мартинюк Р. С. Президент і виконавча влада: співвідношення інститутів у практиці сучасних республік. *Право України*, 2020. № 3. С. 256–269. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/prukr_2020_3_20 (дата звернення: 29.03.2025).
17. Нагорний П. О. Доктринальне визначення поняття «виконавча влада» у контексті реформування органів виконавчої влади України на регіональному рівні. *Європейські перспективи*, 2017. № 2. С. 21–26. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/evpe_2017_2_5 (дата звернення: 29.03.2025).
18. Папуша В. С. Виконавча влада: місце та роль в системі державної влади. *Державне управління: удосконалення та розвиток*, 2015. № 12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Duur_2015_12_11 (дата звернення: 29.03.2025).

19. Присяжнюк А. Є. Виконавча влада як об'єкт державного контролю. *Форум права*, 2011. № 4. С. 594–599. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/FP_index (дата звернення: 29.03.2025).

20. Про внесення змін до Закону України «Про місцеві державні адміністрації» та деяких інших законодавчих актів України щодо реформування територіальної організації виконавчої влади в Україні: проєкт Закону України від 30 жовтня 2020 № 4298. URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=70293 (дата звернення: 29.03.2025).

21. Про внесення змін до Закону України «Про місцеві державні адміністрації» та деяких інших законодавчих актів України щодо реформування територіальної організації виконавчої влади в Україні: проєкт Закону України від 20 березня 2025 року № 13124, внесений народними депутатами України Фроловим П. В. та ін. URL: https://itd.rada.gov.ua/billinfo/Bills/Card/56037 (дата звернення: 29.03.2025).

22. Про внесення змін до Конституції України (щодо децентралізації влади): проєкт Закону України, внесений Президентом України 01 липня 2015 року, зареєстрований у Верховній раді України за № 2217а. URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=55812 (дата звернення: 29.03.2025).

23. Про префектів: проєкт Закону України від 13 грудня 2019 року. URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc34?id=&pf3511=67644&pf35401=514377 (дата звернення: 29.03.2025).

24. Про префектів: проєкт Закону України від 26 серпня 2015 року. URL: https://ips.ligazakon.net/document/NT1780 (дата звернення: 29.03.2025).

25. Про схвалення Концепції реформування місцевого самоврядування та територіальної організації влади в Україні: розпорядження Кабінету Міністрів України від 1 квітня 2014 року № 333-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/333-2014-%D1%80#Text (дата звернення: 29.03.2025).

26. Процюк І. В. Виконавча влада в парламентських державах. *Актуальні проблеми держави і права*, 2021. Вип. 91. С. 174–185. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/apdp_2021_91_24 (дата звернення: 29.03.2025).

27. Стеценко С. Г. Виконавча влада та роль Конституції України в організації її діяльності. *Юридична наука і практика*, 2011. № 2. С. 67–72. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/njj_2011_2_11 (дата звернення: 29.03.2025).

28. Хоменко О. В. Виконавча влада за умов парламентської республіки та монархії (парламентської демократії). *Форум права*, 2012. № 1. С. 1037–1045. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/FP_index (дата звернення: 29.03.2025).

29. Хоменко О. В. Виконавча влада за умов президентської республіки. *Право і суспільство*, 2013. № 5. С. 29–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pis_2013_5_8 (дата звернення: 29.03.2025).

30. Чернишевич О. В. Виконавча влада в Україні на рубежі XX-XXI століть: правовий та історичний аспект. *Вісник Академії адвокатури України*, 2014. Т. 11, № 1. С. 27–35. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaau_2014_11_1_6 (дата звернення: 29.03.2025).

31. Шаповал Т. Президент України і виконавча влада (конституційний аспект). *Вісник Національної академії прокуратури України*, 2012. № 2. С. 44–49. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnapu_2012_2_10 (дата звернення: 29.03.2025).

References

1. Artemchuk D. O. Vykonavcha vlada: ponyattya i formy orhanizatsiyi. *Naukovyy visnyk Mizhnarodnoho humanitarnoho universytetu. Seriya : Yurysprudentsiya*, 2015. Vyp. 13 (1). S. 53–55. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvmgu_jur_2015_13(1)__14 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian]

2. Borodin I. L. Vykonavcha vlada v teoriyi podilu vlad. Yurydychnyy visnyk. *Povitryane i kosmichne pravo*, 2019. № 4. S. 41–47. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnau_2019_4_8 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian]

3. Vysnovok shchodo proyektu Zakonu "Pro vnesennya zmin do Zakonu Ukrayiny "Pro mistsevi derzhavni administratsiyi" ta deyakykh inshykh zakonodavchykh aktiv Ukrayiny shchodo reformuvannya terytorial′noyi orhanizatsiyi vykonavchoyi vlady v Ukrayini" (#4298) m. Strasburh, 21 lyutoho 2024 roku CEGG/LEX(2024)1. URL: https://rm.coe.int/cegg-lex-2024-1-local-state-administrations-draft-law-4298-as-of-21-fe/1680aea85f (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian]

4. Vlada vtretye vzyalasya za zakonoproyekt 4298. URL: https://www.chesno.org/post/5923/ (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian]

5. Het′man YE. A. Vykonavcha vlada: sutnist′ ta zmist. *Aktual'ni problemy prava: teoriya i praktyka*, 2013. № 26. S. 235–241. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/app_2013_26_33 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian]

6. Het′man YE. A. Vykonavcha vlada ta derzhavne upravlinnya: spivvidnoshennya ponyat′. *Problemy zakonnosti*, 2013. Vyp. 122. S. 24–30. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pz_2013_122_5 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian]

7. Holosnichenko D. I., Yarok I. S. Derzhavnyy rezhym ta vykonavcha vlada. *Yurydychna Ukrayina*, 2020. № 6. S. 6–12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/urykr_2020_6_3 (data zverneennya: 29.03.2025) [in Ukrainian]

8. Dikhtiyevs′kyy P. V. Derzhavne upravlinnya i vykonavcha vlada: spivvidnoshennya, tendentsiyi suchasnoho rozvytku. Yurydychnyy visnyk. *Povitryane i kosmichne pravo*, 2011. № 1. S. 42–45. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnau_2011_1_11 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian]

9. Dubohriy S. V., Kostenko-Kosteychuk H. A. Vykonavcha vlada Ukrayiny yak ob″yekt kontrolyu za dotrymannyam prav i zakonnykh interesiv hromadyan. *Trypil's'ka tsyvilizatsiya*, 2012. № 8. S. 53–57. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Trcyv_2012_8_13 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

10. Zhylin YE. V. Vykonavcha vlada v Ukrayini: znachennya ta sutnist′. *Forum prava*, 2013. № 3. S. 208–213. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/FP_index (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

11. Zhuravel′ YA. V. Kontsept «vykonavcha vlada» u suchasnomu polityko-upravlins′komu dyskursi. *Yurydychnyy byuleten'*, 2019. Vyp. 11(1). S. 281–286. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ub_2019_11(1)__38 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

12. Zadyraka N. Derzhavne upravlinnya ta vykonavcha vlada: spivvidnoshennya ponyat′. *Visnyk Kyyivs'koho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Yurydychni nauky*, 2011. Vyp. 89. S. 41–43. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU_Yur_2011_89_12 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

13. Zakonoproyekt 4298 (pro mistsevi derzhadministratsiyi) superechyt′ Yevropeys′kiy khartiyi mistsevoho samovryaduvannya. URL: https://auc.org.ua/novyna/zakonoproyekt-4298-pro-miscevi-derzhadministraciyi-superechyt-yevropeyskiy-hartiyi-miscevogo (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

14. Kalinichenko L. F. Hlava derzhavy, parlament ta vykonavcha vlada yak instytuty kontrolyu za realizatsiyeyu konstytutsiynykh prav, svobod ta obov″yazkiv lyudyny i hromadyanyna v Ukrayini. *Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal "Internauka". Seriya : Yurydychni nauky*, 2017. № 3. S. 56-60. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnjiu_2017_3_12 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

15. Klyuchovyy zakonoproyekt № 4298: chy hotovi mistsevi hromady do novykh pravyl nahlyadu? Rezul′taty kruhloho stolu "Nahlyad za zakonnistyu rishen′ orhaniv mistsevoho samovryaduvannya: khto maye zdiysnyuvaty i yakym chynom", 14 zhovtnya 2024 roku. URL: https://rpr.org.ua/news/kliuchovyy-zakonoproiekt-4298-chy-hotovi-mistsevi-hromady-do-novykh-pravyl-nahliadu/ (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

16. Martynyuk R. S. Prezydent i vykonavcha vlada: spivvidnoshennya instytutiv u praktytsi suchasnykh respublik. *Pravo Ukrayiny*, 2020. № 3. S.256-269. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/prukr_2020_3_20 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

17. Nahornyy P. O. Doktrynal′ne vyznachennya ponyattya "vykonavcha vlada" u konteksti reformuvannya orhaniv vykonavchoyi vlady Ukrayiny narehional′nomu rivni. *Yevropeys'kiperspektyvy*, 2017. №2. S. 21–26. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/evpe_2017_2_5 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

18. Papusha V. S. Vykonavcha vlada: mistse ta rol′ v systemi derzhavnoyi vlady. Derzhavne upravlinnya: udoskonalennya ta rozvytok, 2015. № 12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Duur_2015_12_11 (data zvernennya: 29.03.2025).

19. Prysyazhnyuk A. YE. Vykonavcha vlada yak ob″yekt derzhavnoho kontrolyu. *Forum prava*, 2011. № 4. S. 594–599. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/FP_index (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

20. Pro vnesennya zmin do Zakonu Ukrayiny "Pro mistsevi derzhavni administratsiyi" ta deyakykh inshykh zakonodavchykh aktiv Ukrayiny shchodo reformuvannya terytorial′noyi orhanizatsiyi vykonavchoyi vlady v Ukrayini: proyekt Zakonu Ukrayiny vid 30 zhovtnya 2020 № 4298. URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=70293 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

21. Pro vnesennya zmin do Zakonu Ukrayiny "Pro mistsevi derzhavni administratsiyi" ta deyakykh inshykh zakonodavchykh aktiv Ukrayiny shchodo reformuvannya terytorial′noyi orhanizatsiyi vykonavchoyi vlady v Ukrayini: proyekt Zakonu Ukrayiny vid 20 bereznya 2025 roku № 13124, vnesenyy narodnymy deputatamy Ukrayiny Frolovym P. V. ta in.. URL: https://itd.rada.gov.ua/billinfo/Bills/Card/56037 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

22. Pro vnesennya zmin do Konstytutsiyi Ukrayiny (shchodo detsentralizatsiyi vlady): proyekt Zakonu Ukrayiny, vnesenyy Prezydentom Ukrayiny 01 lypnya 2015 roku, zareyestrovanyy u Verkhovniy radi Ukrayiny za № 2217a. URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=55812 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

23. Pro prefektiv: proyekt Zakonu Ukrayiny vid 13 hrudnya 2019 roku. URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc34?id=&pf3511=67644&pf35401=514377 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

24. Pro prefektiv: proyekt Zakonu Ukrayiny vid 26 serpnya 2015 roku. URL: https://ips.ligazakon.net/document/NT1780 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

25. Pro skhvalennya Kontseptsiyi reformuvannya mistsevoho samovryaduvannya ta terytorial′noyi orhanizatsiyi vlady v Ukrayini: rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 1 kvitnya 2014 roku № 333-r. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/333-2014-%D1%80#Text (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

26. Protsyuk I. V. Vykonavcha vlada v parlament·s′kykh derzhavakh. *Aktual'ni problemy derzhavy i prava*, 2021. Vyp. 91. S. 174–185. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/apdp_2021_91_24 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

27. Stetsenko S. H. Vykonavcha vlada ta rol′ Konstytutsiyi Ukrayiny v orhanizatsiyi yiyi diyal′nosti. *Yurydychna nauka i praktyka*, 2011. № 2. S. 67–72. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/njj_2011_2_11 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

28. Khomenko O. V. Vykonavcha vlada za umov parlament·s′koyi respubliky ta monarkhiyi (parlament·s′koyi demokratiyi). *Forum prava*, 2012. № 1. S. 1037–1045. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/FP_index (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

29. Khomenko O. V. Vykonavcha vlada za umov prezydent·s′koyi respubliky. *Pravo i suspil'stvo*, 2013. № 5. S. 29–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pis_2013_5_8 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

30. Chernyshevych O. V. Vykonavcha vlada v Ukrayini na rubezhi XX–XXI stolit′: pravovyy ta istorychnyy aspekt. *Visnyk Akademiyi advokatury Ukrayiny*, 2014. T. 11, № 1. S. 27–35. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vaau_2014_11_1_6 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

31. Shapoval T. Prezydent Ukrayiny i vykonavcha vlada (konstytutsiynyy aspekt). *Visnyk Natsional'noyi akademiyi prokuratury Ukrayiny*, 2012. № 2. S. 44–49. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnapu_2012_2_10 (data zvernennya: 29.03.2025) [in Ukrainian].

НОТАТКИ

ВІСНИК

Херсонського національного технічного університету

Відповідальний за випуск	головний редактор Литвиненко В. І. д.т.н., професор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук, заслужений діяч науки і техніки України
Комп'ютерна верстка	Клименко Т. О.
Відповідальний секретар	Лур'є І. А. к.т.н., доцент, начальник навчально-методичного відділу, доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1541 від 09.05.2024 року. Ідентифікатор медіа: R30-04565.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Херсонський національний технічний університет (вул. Інститутська, буд. 11, м. Хмельницький, 29016, olena.chepelyuk@kntu.net.ua, тел. +38 (0382) 77-35-65).

Періодичність виходу: 4 рази на рік.

Підписано до друку 06.06.2025.
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman. Папір офсет. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 45,11. Замов. № 0825/634. Наклад 100 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.