

ISSN 2618-0332 (print)  
ISSN 2618-0340 (online)

Міністерство освіти і науки України

Херсонський національний технічний університет

# ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

## Т. 6, № 1

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Херсонського національного технічного університету  
(протокол № 3 від 31 жовтня 2023 року)

---

Журнал включений до Реєстру наукових фахових видань України категорії Б  
На підставі Наказу МОН України від 17 березня 2020 року № 409

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв:  
Google Scholar, Index Copernicus International World of Journals, CiteFactor Academic Scientific  
Journals, National Library of Ukraine (Vernadsky)



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2023

## Редакційна рада

### Головний редактор

Астіоненко І.О.

к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри загальноосвітніх, гуманітарних та природничих дисциплін Херсонського національного технічного університету

### Заступники головного редактора

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. П. Могили (м. Миколаїв)

Литвиненко О.І.

к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та фізико-математичних дисциплін Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова

### Відповідальний секретар

Омельчук А.А.

к.т.н., доцент кафедри інтелектуальних управляючих та обчислювальних систем Університету державної фіскальної служби України (м. Ірпінь)

## Члени редакційної колегії за спеціальностями:

### Іноземні фахівці

Бабічев С.О.

к.т.н., доцент (Чехія)

Гучек П.Й.

д.т.н., доцент (Польща)

## 113 – Прикладна математика

Астіоненко І.О.

к.ф.-м.н., доцент

Гвоздева І.М.

д.т.н., професор

Гнатушенко В.В.

д.т.н., доцент

Ляшенко В.П.

д.т.н., професор

Миргород В.Ф.

д.т.н., доцент

Різник В.В.

д.т.н., професор

Стрельнікова О.О.

д.т.н., професор

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., професор

## 112 – Комп'ютерні науки

Борисенко В.Д.	д.т.н., професор
Ванін В.В.	д.т.н., професор
Вірченко Г.А.	д.т.н., професор
Гнатушенко В.В.	д.т.н., професор
Гумен О.М.	д.т.н., професор
Корчинський В.М.	д.т.н., професор
Литвиненко В.І.	д.т.н., професор
Мартин Є.В.	д.т.н., професор
Несвідомін В.М.	д.т.н., професор
Пилипака С.Ф.	д.т.н., професор
Устенко С.А.	д.т.н., професор
Шоман О.В.	д.т.н., професор

## 126 – Інформаційні системи та технології

Аль-Амморі А.Н.	д.т.н., професор
Баклан І.В.	к.т.н., доцент
Бень А.П.	к.т.н., доцент
Левикін В.М.	д.т.н., професор
Литвиненко О.І.	к.т.н., доцент
Мороз Б.І.	д.т.н., професор
Стеценко І.В.	д.т.н., професор
Шерстюк В.Г.	д.т.н., професор

## 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Алексєєв М.О.	д.т.н., професор
Головко В.І.	д.т.н., професор
Кондратець В.О.	д.т.н., професор
Мещеряков Л.І.	д.т.н., професор
Омельчук А.А.	к.т.н.
Осадчий С.І.	д.т.н., професор
Рудакова Г.В.	д.т.н., професор

## Інші спеціальності

Дудченко О.М.	к.ф.-м.н., доцент
Кузьмич В.І.	к.ф.-м.н., доцент
Літвінова М.Б.	д.пед.н., к.ф.-м.н., професор
Мельник І.В.	д.т.н., професор

ISSN 2618-0332 (print)  
ISSN 2618-0340 (online)

Ministry of Education and Science of Ukraine

Kherson National Technical University

# **APPLIED QUESTIONS OF MATHEMATICAL MODELLING**

## **V. 6, №1**

Recommended for publication by the Academic Council of  
Kherson National Technical University  
(Minutes No 3 on 31th October 2023)

---

The journal is included in the scientometric bases, electronic libraries and repositories:  
Google Scholar, Index Copernicus International World of Journals, CiteFactor Academic Scientific  
Journals, National Library of Ukraine (Vernadsky)



Publishing House  
"Helvetica"  
2023

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

Astionenko I.O. – Ph.D., Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of General Education, Humanities and Natural Science Disciplines of Kherson National Technical University

### Deputies Editor-in-Chief

Khomchenko A.N.

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Professor at the Department of Intelligent Information Systems of the Petro Mohyla Black Sea National University

Lytvynenko O.I.

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology and Physical and Mathematical Disciplines of the Kherson Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding

### Executive Secretary

Omelchuk A.A.

Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Technical Cybernetics of Kherson National Technical University

## Members of Editorial Board by Specialties:

### Foreign Specialists

**Babichev S.O.**

Ph.D., Associate Professor (Czech Republic)

**Huchek P.Y.**

Doctor of Engineering Science,  
Associate Professor (Republic of Poland)

### 113 – Applied Mathematics

**Astionenko I.O.**

Ph.D., Associate Professor

**Hvozdeva I.O.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Hnatushenko V.V.**

Doctor of Engineering Science, Associate Professor

**Liashenko V.P.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Myrhorod V.F.**

Doctor of Engineering Science, Associate Professor

**Riznyk V.V.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Strelnikova O.O.**

Doctor of Engineering Science, Professor

**Khomchenko A.N.**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences,  
Professor

## 122 – Computer Science

<b>Borysenko V.D.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Vanin V.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Virchenko H.A.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Hnatushenko V.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Humen O.M.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Korchynskyi V.M.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Lytvynenko V.I.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Martyn Ye.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Nesvidomin V.M.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Pylypaka S.F.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Ustenko S.A.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Shoman O.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor

## 126 – Information Systems and Technologies

<b>Al-Ammori A.N.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Baklan I.V.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Ben A.P.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Levykin V.M.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Lytvynenko O.I.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Moroz B.I.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Stetsenko I.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Sherstiuk V.H.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor

## 151 – Automation and Computer Integrated Technologies

<b>Aleksieiev M.O.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Holovko V.I.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Kondratets V.O.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Meshcheriakov L.I.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Omelchuk A.A.</b>	Ph.D.
<b>Osadchyi S.I.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor
<b>Rudakova H.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor

## Other Specialties

<b>Dudchenko O.N.</b>	Ph.D., Professor
<b>Kuz'mich V.I.</b>	Ph.D., Associate Professor
<b>Litvinova M.B.</b>	Doctor of Pedagogical Sciences, Ph.D. (physpcs and mathematics), Professor
<b>Melnyk I.V.</b>	Doctor of Engineering Science, Professor

## ЗМІСТ

<b>ТРОКНУМСЬКИЙ Р.Р., ВІЛНУРСЬКИЙ О.М., ЗАМУРУЄВА О.М.</b> MAIN PROBLEMS OF EVOLUTION THE CYBERNETICS AND COMPUTER SCIENCE.....	9
<b>ГРИЦЬК В.В., ЗАДОРЖНИЙ В.І.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕОРІЇ ЗОБРАЖЕНЬ: ПОПЕРЕДНЯ ОБРОБКА – ВИДІЛЕННЯ КРАЇВ .....	20
<b>ДУМАНСЬКА В.В., НАЗАРЕНКО О.А.</b> РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МАЛОРОЗМІРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОКРИТТІВ ПІШОХІДНИХ ДОРІЖОК І МАЙДАНЧИКІВ ЗІ ЗМІНЕНОЮ НИЖНЬОЮ ОСНОВОЮ .....	30
<b>ЖУРАН О.А., ФОНАР Л.С., КОНОВАЛОВ О.С., ПАНІН В.О.</b> АНАЛІЗ РИЗИКІВ ІТ-ПРОЄКТУ ВЕБРЕСУРСУ ДЛЯ КОМУНІКАЦІЇ ОСВІТНІХ ЗАКЛАДІВ .....	37
<b>ЖУЧЕНКО Л.К.</b> СИСТЕМА ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ .....	46
<b>ЗАВАЛЬНЮК Є.К., РОМАНЮК О.Н., КОРОБЕЙНИКОВА Т.І.</b> ВИСОКОПРОДУКТИВНЕ НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ ЗАФАРБОВУВАННЯ ТРИВИМІРНИХ ФІГУР НА ОСНОВІ МОДЕЛІ PIX2PIX .....	54
<b>КАЛЮЖНЯК А.В.</b> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБЧИСЛЕНЬ У РОЗПОДІЛЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ЗА ДОПОМОГОЮ БІБЛІОТЕКИ MPI .....	66
<b>КЮСАК В.А., ІСАЄВ В.Ф., ПАЛЬЧИК С.С.</b> ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРУБОПРОВОДУ ПІСЛЯ АВАРІЙНОГО РЕМОНТУ .....	73
<b>КОНДРАТЕЦЬ В.О., МАЦУЙ А.М., СЕРБУЛ О.М., ФЕДОТОВА М.О.</b> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄМУ ЗАХОПЛЕНОЇ ДОЗИ ПУЛЬПИ ЗАВИТКОМ ЖИВИЛЬНИКА В РАЗІ ПОВОРОТУ СИСТЕМИ КООРДИНАТ .....	82
<b>КОРЧИНСЬКИЙ В.М.</b> ФІЛЬТРАЦІЯ ЗАВАД БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ: ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ ПІДХІД .....	93
<b>МАЗМАНІШВИЛІ О.С.</b> МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПЛОСКОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ В НЕОДНОРІДНОМУ НЕПОГЛИНАЮЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ .....	100
<b>МОСЬПАН Д.В., ЮРКО О.О.</b> ПОБУДОВА ТА МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗАГОТОВКИ.....	108
<b>НЕВЗОРОВ А.В., СКЛЯРЕНКО О.В., КОЛОДІНСЬКА Я.О., ЯРОВИЙ Р.О.</b> ОСОБЛИВОСТІ АНАЛІТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ОБЛАДНАННЯ В СУЧАСНИХ УМОВАХ .....	117
<b>РАТУШНЯК Т.В., ГЛАДЧЕНКО О.В., ОМЕЛЬЧУК А.А., ВИШЕМІРСЬКА Я.С.</b> ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ СФЕРИЧНОЇ 3D-ПАНОРАМИ ДЛЯ СОЦІАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ FACEBOOK.....	124
<b>УСОВ А.В., КУНЦІН М.В., ЗАЙЧИК Ю.І.</b> ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ДЛЯ БЕЗДЕФЕКТНОЇ ОБРОБКИ ВИРОБІВ ІЗ МАТЕРІАЛІВ, СХИЛЬНИХ ДО ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ .....	134
<b>ЯРЕЦЬКА Н.О., РАМСЬКИЙ А.О., МОРОЗ В.В.</b> ПОБУДОВА РОЗВ'ЯЗКІВ ОСНОВНИХ РІВНЯНЬ ЛІНЕАРИЗОВАНОЇ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ ДЛЯ КІЛЬЦЕВИХ ТІЛ .....	147

**CONTENTS**

**TROKHYMCHUK P.P., VILIHURSKYI O.M., ZAMURUIEVA O.M.**  
 MAIN PROBLEMS OF EVOLUTION THE CYBERNETICS AND COMPUTER SCIENCE..... 9

**HRYTSYK V.V., ZADOROZHNI V.I.** RESEARCH OF IMAGE THEORY:  
 PREPROCECION – EDGE DETECTORS..... 20

**DUMANSKA V.V., NAZARENKO O.A.** CALCULATION OF PARAMETERS  
 OF SMALL-SIZED PAVEMENT ELEMENTS OF FOOTPATHS  
 AND AREAS WITH A MODIFIED UNDERSIDE SURFACE ..... 30

**ZHURAN O.A., FONAR L.S., KONOVALOV O.S., PANIN V.O.** RISK ANALYSIS OF AN IT PROJECT  
 FOR A WEB RESOURCE AIMED AT COMMUNICATION IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS ..... 37

**ZHUCHENKO L.K.** PROGRAM CONTROL SYSTEM  
 OF THE PROCESS OF CARBON PRODUCTS BURNING ..... 46

**ZAVALNIUK YE.K., ROMANIUK O.N., KORUBEINIKOVA T.I.** HIGHLY PRODUCTIVE  
 NEURAL SHADING OF THREE-DIMENSIONAL FIGURES USING PIX2PIX MODEL..... 54

**KALIUZHNIAK A.V.** COMPUTATION EFFICIENCY ENHANCEMENT  
 IN DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEMS WITH THE MPI LIBRARY ASSISTANCE ..... 66

**KIOSAK V.A., ISAIEV V.F., PALCHYK S.S.** FORECASTING THE DURATION  
 OF OPERATION OF THE PIPELINE AFTER AN EMERGENCY REPAIR ..... 73

**KONDRATETS V.O., MATSUI A.M., SERBUL O.M., FEDOTOVA M.O.**  
 MATHEMATICAL MODELLING OF THE VOLUME OF THE CAPTURED SLURRY DOSE  
 BY THE FEEDER CURL WHEN THE COORDINATE SYSTEM IS ROTATED ..... 82

**KORCHYNSKYI V.M.** NOISE FILTERING  
 OF MULTISPECTRAL DIGITAL SIGNALS: OPTIMIZATION APPROACH ..... 93

**MAZMANISHVILI O.S.** SIMULATION OF PLANE ELECTROMAGNETIC  
 WAVE PROPAGATION IN AN INHOMOGENEOUS NONABSORBING MEDIUM..... 100

**MOSPAN D.V., YURKO O.O.** CONSTRUCTION AND SIMULATION  
 OF THE AUTOMATED BILLET POSITIONING SYSTEM ..... 108

**NEVZOROV A.V., SKLIARENKO O.V., KOLODINSKA YA.O., YAROVYI R.O.**  
 FEATURES ANALYTICAL SUPPORT OPERATING EQUIPMENT IN MODERN CONDITIONS ..... 117

**RATUSHNYAK T.V., HLADCHENKO O.V., OMELCHUK A.A., VYSHEMIRSKA YA.S.**  
 TECHNOLOGY FOR CREATING A VIRTUAL SPHERICAL 3D-PANORAMA  
 FOR THE SOCIAL NETWORK FACEBOOK..... 124

**USOV A.V., KUNITSYN M.V., ZAYCHYK YU.I.** INFORMATION PROVISION  
 OF TECHNOLOGICAL OPPORTUNITIES FOR DEFECT-FREE PROCESSING  
 OF PRODUCTS MADE OF MATERIALS PRONE TO CRACK FORMATION..... 134

**YARETSKA N.O., RAMSKYI A.O., MOROZ V.V.**  
 CONSTRUCTION OF SOLUTIONS OF THE BASIC EQUATIONS  
 OF THE LINEARIZED THEORY OF ELASTICITY FOR RING BODIES ..... 147



P.P. TROKHYMCHUK, O.M. VILIHURSKYI, O.M. ZAMURUIEVA  
Lesya Ukrainka Volyn National University

## MAIN PROBLEMS OF EVOLUTION THE CYBERNETICS AND COMPUTER SCIENCE

*The problems of evolution the cybernetics and computer science are analysing. Short historical analysis of this problem is representiung. It is including Greek abacus, the Peruvian system of nodal counting Kipu. The role of Blaise Pascal and Wilhelm Leibniz in establishing the foundations of computer science is noted. The next stage in the development of computer science was the research of Charles Babbage and Lady Ada Lovelace. It was Ada Lovelace, who initiated the programming procedure. The concept of cybernetics as the management of ships originated in Greece. In the 19th century, it was formulated as a science of management by F.-M. Ampere and B. Trentowski. It was completed by N. Wiener, according to whom cybernetics is the science of control in the living and non-living world. Later, cybernetics became the basis of computing. In its bowels, the theory of automatic regulation was expanded and the foundations of modern information theory were formulated. As F. George showed, cybernetics is a synthetic science that includes a number of sciences that are needed to solve the relevant problem. Research has been conducted on the development of the hardware base of modern cybernetics and computer science: from pebbles, nodules and bones to modern optoelectronic systems. Modern computer science has a somewhat broader meaning as defined by N. Wiener. The main task of modern computer science is the formalization of the thesis of the Canadian philosopher L. Hall "Everything that comes from the head is intelligent". In this case, along with the elementary base, programming received significant development. Along with narrow-profile programming languages (Fortran, Pascal), the system programming languages C and cross-hierarchical programming (Python have been created. The structure of computer science has also changed significantly. The further development of computer systems is obviously related to the reduction of time and simplification of the procedure for obtaining the necessary information. Possible ways of implementing this are also discussed.*

*Key words: cybernetics, computer science, evolution, hardware, software, polymetrical analysis, Python.*

П.П. ТРОХИМЧУК, О.М. ВІЛІГУРСЬКИЙ, О.М. ЗАМУРУЄВА  
Волинський національний університет імені Лесі Українки

## ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ЕВОЛЮЦІЇ КІБЕРНЕТИКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК

*У статті проаналізовано проблеми еволюції кібернетики й інформатики. Подано короткий історичний аналіз цієї проблеми. Сюди входить абак, перуанська вузликівна система рахунку Кіпу. Відзначається роль Блеза Паскаля й Вільгельма Ляйбніца у створенні основ інформатики. Наступним етапом у розвитку інформатики стали дослідження Чарльза Беббіджа й леді Ади Лавлейс. Саме Ада Лавлейс ініціювала процедуру створення програмування. Поняття кібернетики як управління кораблями виникло в Греції. У 19 столітті воно сформульовано як наука про управління Ф.-М. Ампером і Б. Трентовським. Його завершив Н. Вінер, згідно з яким кібернетика – це наука про управління живим і неживим світом. Пізніше кібернетика стала основою обчислювальної техніки. У її надрах розширено теорію автоматичного регулювання та сформульовано основи сучасної теорії інформації. Як показав Ф. Джордж, кібернетика є синтетичною наукою, яка включає низку наук, необхідних для розв'язання відповідної проблеми. Проведено дослідження щодо розвитку апаратної бази сучасної кібернетики й інформатики: від камінчиків, вузликів і кісток до сучасних оптоелектронних систем. Сучасна інформатика має децю ширше значення за визначенням Н. Вінера. Основним завданням сучасної інформатики є формалізація тези канадського філософа Л. Холла: «Усе, що йде від голови, є розумним». При цьому поряд з елементарною базою значного розвитку набуло програмування. Поряд із вузькопрофільними мовами програмування (Fortran, Pascal) створені мови системного програмування C, C<sup>++</sup> і міжєрархічного програмування (Python). Значно змінилася і структура комп'ютерних наук. Подальший розвиток комп'ютерних систем, очевидно, пов'язаний зі скороченням часу і спрощенням процедури отримання необхідної інформації. Також обговорюються можливі шляхи її реалізації.*

*Ключові слова: синтез, кібернетика, інформатика, штучний інтелект, системний аналіз, поліметричний аналіз, принцип Моїсеєва, Пайтон.*

### Introduction

In the main problems of evolution the cybernetics and computer science wu must select next aspects: problems of calculation (computation; problem of organization this calculations and area

of possible applications these calculations) [1–23]. These three aspects are determined by the level of development of civilization at one or another period of its existence. It should be noted that these three aspects are characteristic of all epochs to one degree or another. Therefore, we will analyze the evolution of cybernetics and informatics based on this point of view.

Short historical analysis of this problem is representing. It is including Ancient Egyptian, Sumerian, Indian, Chinese, Antiquity, Jewish, Peru and other civilizations, including mythology, Pythagorean, Plato and other systems, Greek abacus, the Peruvian system of nodal counting [2; 16; 23].

The role of Blaise Pascal and Wilhelm Leibniz in establishing the foundations of computer science is noted [2; 12–16; 23].

The next stage in the development of computer science was the research of Charles Babbage and Lady Ada Lovelace [2; 3; 12–16; 23]. Ada Lovelace was initiating the programming procedure.

The concept of cybernetics as the management of ships originated in Greece [2; 16; 23]. In the 19th century, it was formulated as a science of management by F.-M. Ampere [2; 16; 23] and B. Trentowski [17]. It was completed by N. Wiener, according to whom cybernetics is the science of control in the living and non-living world [11]. Later, cybernetics became the basis of computing. In its bowels, the theory of automatic regulation was expanded and the foundations of modern information theory were formulated. As F. George showed, cybernetics is a synthetic science that includes a number of sciences that are needed to solve the relevant problems [4]. Research has been conducted on the development of the hardware base of modern cybernetics and computer science: from pebbles, nodules and bones to modern optoelectronic systems.

Modern computer science has a somewhat broader meaning as defined by N. Wiener [12–15]. The main task of modern computer science is the formalization of the thesis of the Canadian philosopher L. Hall “Everything that comes from the head is intelligent” [1; 2; 16]. In this case, along with the elementary base, programming received significant development. Along with narrow-profile programming languages (Fortran, Pascal), the system programming languages C and cross-hierarchical programming (Python [9; 10]) have been created [11–15].

The structure of computer science has also changed significantly. The further development of computer systems is obviously related to the reduction of time and simplification of the procedure for obtaining the necessary information.

Possible ways of implementing this are also discussed.

### **Main results**

The history of computer science began long before the modern discipline of computer science, usually appearing in forms like mathematics or physics. Developments in previous centuries alluded to the discipline that we now know as computer science [12–16]. This progression, from mechanical inventions and mathematical theories towards modern computer concepts and machines, led to the development of a major academic field, massive technological advancement across the Western world, and the basis of a massive worldwide trade and culture.

It is certain that the analysis of the evolution of computing methods and systems should begin with ancient civilizations [2; 16].

Thus, in ancient Egypt, the elements of algebra were introduced and a universal coded system of calculations was created, which is called the tablet of the god Thoth. Based on this, the god Thoth taught the Egyptians to count, write and cultivate the Earth. The first two provisions were deciphered using the methods of modern information theory. Roughly speaking, this tablet was the prototype of the first computer [2; 16].

Spherical geometry, astrology, the basics of matrix arithmetic and the abacus were created in ancient Sumer, which was widely used in Mediterranean civilizations by both the Phoenicians and the Greeks [2; 16].

Matrix calculation was needed for compiling astrological tables. In addition, computational methods were needed for the development of building mechanics (Egyptian pyramids, temples) and irrigation [2; 16].

The earliest known tool for use in computation was the abacus, developed in the period between 2700 and 2300 BCE in Sumer. The Sumerians' abacus consisted of a table of successive columns which delimited the successive orders of magnitude of their sexagesimal number system. Its original style of usage was by lines drawn in sand with pebbles. Abaci of a more modern design are still used as calculation tools today, such as the Chinese abacus [2; 16; 23].

In the 5th century BC in ancient India, the grammarian Pāṇini formulated the grammar of Sanskrit in 3959 rules known as the Ashtadhyayi which was highly systematized and technical. Panini used metarules, transformations and recursions [23].

The phrase “Numbers rule the world” belongs to Pythagoras. It was the Pythagorean school that connected you with numbers. In general, the Pythagorean school was a synthesis of the esoteric Egyptian ritual system and the open Sumerian and Indian ones. In 1980–83, German archaeologists excavated several cities with octagonal houses and half-eight houses in the quarter. The civilization existed in the 6th – 5th centuries BC, but does not fit into any of the known civilizations at the time. It is likely that they were the Pythagoreans [2; 16].

Plato attached great importance to mathematics. It was his classification of numbers that was the first attempt to describe existing knowledge using mathematics. According to Plato, there are three types of numbers: mathematical (pure mathematics), sensory (applied mathematics) and ideal (numerology, from a modern point of view, numerical coding of information) [2; 16].

The classifications of Aristotle and Euclid played a significant role in the development of modern science [2; 16]. Thanks to Aristotle, the classification of modern sciences began and the foundations of formal logic were developed, which was the completion of the works of Socrates and Plato. From this point of view, formal logic can be considered formalized rules for conducting a dispute. Euclid first classified mathematical disciplines and created an axiomatic method of their description, which is practically relevant in successful mathematics.

From an organizational point of view, an important role in the creation of science was played by the Alexandria Museum, which was created by a friend of Great Alexander in Alexandria, Egypt. From the 3rd century BC to the 4th century AD, it was an organization for the development of, as it is now commonly called, Hellenic culture. Here, science developed along the lines laid down by Plato and Aristotle, since Aristotle was Ptolemy's teacher [2; 16].

The Antikythera mechanism is believed to be an early mechanical analog computer. It was designed to calculate astronomical positions. It was discovered in 1901 in the Antikythera wreck off the Greek island of Antikythera, between Kythera and Crete, and has been dated to *circa* 100 BC [12–15; 23].

The traditions of the Alexandria Museum were continued in the Muslim world (Baghdad Caliphate, Merage, Morocco, Cordoba, Granada, etc.). The fact is that, according to Mohammed, every Muslim man and woman should learn from everyone, even the Chinese. In this respect, Islam was much more tolerant of science than medieval Christianity. Only later, during the Renaissance, the same traditions began to be revived in Christian countries. The reason for this was both the crusades and the cultural contacts of the Saints. And so it turned out that the Greek Alexandrian manuscripts were translated not from the Greek language, but from the Arabian language, into Latin [2; 16].

Mechanical analog computer devices appeared again a thousand years later in the medieval Islamic world and were developed by Muslim astronomers, such as the mechanical geared astrolabe by Abū Rayhān al-Bīrūnī, and the torquetum by Jabir ibn Aflah. According to Simon Singh, Muslim mathematicians also made important advances in cryptography, such as the development of cryptanalysis and frequency analysis by Alkindus. Programmable machines were also invented by Muslim engineers, such as the automatic flute player by the Banū Mūsā brothers [12–15; 23].

The first scientists who studied the principles of cybernetics are Su Song, Heron of Alexandria and Ctesibius [12–15; 23]. The latter invented the first artificial automatic control system – a water clock [12–15; 23].

However, further expansion of computing science and the creation of the ideological basis of modern computing were developed in Europe [2; 16].

It should be noted that the first mechanical robot that could pronounce the simplest words was constructed in the 13th century R. Bacon [2; 16].

Technological artifacts of similar complexity appeared in 14th century Europe, with mechanical astronomical clocks [23].

When John Napier discovered logarithms for computational purposes in the early 17th century, there followed a period of considerable progress by inventors and scientists in making calculating tools. In 1623 Wilhelm Schickard designed a calculating machine, but abandoned the project, when the prototype he had started building was destroyed by a fire in 1624. Around 1640, Blaise Pascal, a leading French mathematician, constructed a mechanical adding device based on a design described by Greek mathematician Hero of Alexandria. Then in 1672 Gottfried Wilhelm Leibniz invented the Stepped Reckoner which he completed in 1694 [2; 16; 23].

In the 17th century, the rules for constructing any theory were formulated (Descartes' method and Newton's four rules of inference in physics). Roughly speaking, this is the procedure of Euclidean axiomatization. Thanks to this, it became possible to realize R. Bacon's thesis that "science is as much science as there is mathematics in it" [2; 16].

Charles Babbage is often regarded as one of the first pioneers of computing [3; 23]. Beginning in the 1810s, Babbage had a vision of mechanically computing numbers and tables. Putting this into reality, Babbage designed a calculator to compute numbers up to 8 decimal points long. Continuing with the success of this idea, Babbage worked to develop a machine that could compute numbers with up to 20 decimal places [3; 23]. By the 1830s, Babbage had devised a plan to develop a machine that could use punched cards to perform arithmetical operations. The machine would store numbers in memory units, and there would be a form of sequential control. This means that one operation would be carried out before another in such a way that the machine would produce an answer and not fail. This machine was to be known as the "Analytical Engine", which was the first true representation of what is the modern computer [3; 23].

Ada Lovelace (Augusta Ada Byron) is credited as the pioneer of computer programming and is regarded as a mathematical genius [3; 23]. Lovelace began working with Charles Babbage as an assistant while Babbage was working on his "Analytical Engine", the first mechanical computer. During her work with Babbage, Ada Lovelace became the designer of the first computer algorithm, which had the ability to compute Bernoulli numbers [3; 23], although this is arguable as Charles was the first to design the difference engine and consequently its corresponding difference based algorithms, making him the first computer algorithm designer. Moreover, Lovelace's work with Babbage resulted in her prediction of future computers to not only perform mathematical calculations, but also manipulate symbols, mathematical or not. While she was never able to see the results of her work, as the "Analytical Engine" was not created in her lifetime, her efforts in later years, beginning in the 1840s, did not go unnoticed [3; 23].

Following Babbage, although at first unaware of his earlier work, was Percy Ludgate, a clerk to a corn merchant in Dublin, Ireland. He independently designed a programmable mechanical computer, which he described in a work that was published in 1909 [23].

Two other inventors, Leonardo Torres Quevedo and Vannevar Bush, also did follow on research based on Babbage's work. In his *Essays on Automatics* (1914), Torres designed an analytical electromechanical machine that was controlled by a read-only program and introduced the idea of floating-point arithmetic [11–15; 23]. In 1920, to celebrate the 100th anniversary of the invention of the arithmometer, he presented in Paris the Electromechanical Arithmometer, which consisted

of an arithmetic unit connected to a (possibly remote) typewriter, on which commands could be typed and the results printed automatically. Bush's paper *Instrumental Analysis* (1936) discussed using existing IBM punch card machines to implement Babbage's design [11–15; 23]. In the same year he started the Rapid Arithmetical Machine project to investigate the problems of constructing an electronic digital computer [11–15; 23].

Up to and during the 1930s, electrical engineers were able to build electronic circuits to solve mathematical and logic problems, but most did so in an *ad hoc* manner, lacking any theoretical rigor. This changed with switching circuit theory in the 1930s. From 1934 to 1936, Akira Nakashima, Claude Shannon, and Viktor Shetakov published a series of papers showing that the two-valued Boolean algebra, can describe the operation of switching circuits [11–15; 23]. This concept, of utilizing the properties of electrical switches to do logic, is the basic concept that underlies all electronic digital computers. Switching circuit theory provided the mathematical foundations and tools for digital system design in almost all areas of modern technology [11–15; 23].

While taking an undergraduate philosophy class, Shannon had been exposed to Boole's work, and recognized that it could be used to arrange electromechanical relays (then used in telephone routing switches) to solve logic problems. His thesis became the foundation of practical digital circuit design when it became widely known among the electrical engineering community during and after World War II [11–15; 23].

Since the values stored by digital machines were not bound to physical properties like analog devices, a logical computer, based on digital equipment, was able to do anything that could be described "purely mechanical". The theoretical Turing Machine, created by Alan Turing, is a hypothetical device theorized in order to study the properties of such hardware [11–15; 23].

The mathematical foundations of modern computer science began to be laid by Kurt Gödel with his incompleteness theorem (1931). In this theorem, he showed that there were limits to what could be proved and disproved within a formal system. This led to work by Gödel and others to define and describe these formal systems, including concepts such as mu-recursive functions and lambda-definable functions [11–15; 23].

In 1936 Alan Turing and Alonzo Church independently, and also together, introduced the formalization of an algorithm, with limits on what can be computed, and a "purely mechanical" model for computing. This became the Church-Turing thesis, a hypothesis about the nature of mechanical calculation devices, such as electronic computers. The thesis states that any calculation that is possible can be performed by an algorithm running on a computer, provided that sufficient time and storage space are available [11–15; 23].

In 1936, Alan Turing also published his seminal work on the Turing machines, an abstract digital computing machine which is now simply referred to as the Universal Turing machine. This machine invented the principle of the modern computer and was the birthplace of the stored program concept that almost all modern day computers use [11–15; 23]. These hypothetical machines were designed to formally determine, mathematically, what can be computed, taking into account limitations on computing ability. If a Turing machine can complete the task, it is considered Turing computable.

The Los Alamos physicist Stanley Frankel, has described John von Neumann's view of the fundamental importance of Turing's 1936 paper, in a letter: I know that in or about 1943 or '44 von Neumann was well aware of the fundamental importance of Turing's paper of 1936... Von Neumann introduced me to that paper and at his urging I studied it with care. Many people have acclaimed von Neumann as the "father of the computer" (in a modern sense of the term) but I am sure that he would never have made that mistake himself. He might well be called the midwife, perhaps, but he firmly emphasized to me, and to others I am sure, that the fundamental conception is owing to Turing [23].

John V. Atanasoff (1903–1995) created the first electric digital computer, known as the Atanasoff-Berry computer [11–15; 23].

The world's first electronic digital computer, the Atanasoff–Berry computer, was built on the Iowa State campus from 1939 through 1942 by John V. Atanasoff, a professor of physics and mathematics, and Clifford Berry, an engineering graduate student [11–15; 23].

In 1941, Konrad Zuse developed the world's first functional program-controlled computer, the Z3. In 1998, it was shown to be Turing-complete in principle. Zuse also developed the S2 computing machine, considered the first process control computer. He founded one of the earliest computer businesses in 1941, producing the Z4, which became the world's first commercial computer. In 1946, he designed the first high-level programming language, Plankalkül. Now programming languages are more complex [11–15; 23]. They developed in next way – Algol – Fortran – Pascal – C C++ – Python [9; 10; 13].

In 1948, the Manchester Baby was completed; it was the world's first electronic digital computer that ran programs stored in its memory, like almost all modern computers. The influence on Max Newman of Turing's seminal 1936 paper on the Turing Machines and of his logico-mathematical contributions to the project, were both crucial to the successful development of the Baby [11–15; 23].

In 1950, Britain's National Physical Laboratory completed Pilot ACE, a small scale programmable computer, based on Turing's philosophy. With an operating speed of 1 MHz, the Pilot Model ACE was for some time the fastest computer in the world<sup>[52][57]</sup>. Turing's design for ACE had much in common with today's RISC architectures and it called for a high-speed memory of roughly the same capacity as an early Macintosh computer, which was enormous by the standards of his day. Had Turing's ACE been built as planned and in full, it would have been in a different league from the other early computers [11–15; 23].

Claude Shannon helped creating the foundation of information theory [2; 16].

The first actual computer bug was a moth. It was stuck in between the relays on the Harvard Mark II [23]. While the invention of the term 'bug' is often but erroneously attributed to Grace Hopper, a future rear admiral in the U.S. Navy, who supposedly logged the "bug" on September 9, 1945, most other accounts conflict at least with these details. According to these accounts, the actual date was September 9, 1947 when operators filed this 'incident' – along with the insect and the notation "First actual case of bug being found" (see software bug for details).

Cybernetics as a science has combined such areas as: control system, biology, neurology, mechanical engineering, etc. Engineer Harold Black gave rise to electronic control systems with his famous works. In 1927, his works were published, which described how, using negative feedback, amplifiers can be controlled. It was later used in artillery and radar control schemes during World War II [2; 16; 23].

In the form in which it is known today, cybernetics began to take shape in 1940. This was due to the work of such prominent scientists as W. Ashby, W. Walter, McCulloch and Wiener. We should not forget about John von Neumann, a scientist who became famous for his work in the field of mathematics and computer science. He made the most important addition – he introduced such a concept as a cellular automaton and its self-reproduction. The father of cybernetics is called the scientist from the USA N. Wiener. In 1948 he published a book called Cybernetics [2; 11; 16; 23].

Rough schema of Cybernetics as synthetic science is represented in Fig. 1 [5; 11].

Really, this synthesis may be change. Now we have physical cybernetics [19], economical cybernetics, etc. [2; 16].

The term artificial intelligence was credited by John McCarthy to explain the research that they were doing for a proposal for the Dartmouth Summer Research [8]. The naming of artificial intelligence also led to the birth of a new field in computer science. On August 31, 1955, a research project was proposed consisting of John McCarthy, Marvin L. Minsky, Nathaniel Rochester, and Claude E. Shannon [8]. The official project began in 1956 that consisted of several significant parts they felt would help them better understand artificial intelligence's makeup.

McCarthy and his colleagues' ideas behind automatic computers was while a machine is capable of completing a task, then the same should be confirmed with a computer by compiling a program to

perform the desired results. They also discovered that the human brain was too complex to replicate, not by the machine itself but by the program. The knowledge to produce a program that sophisticated was not there yet [8].

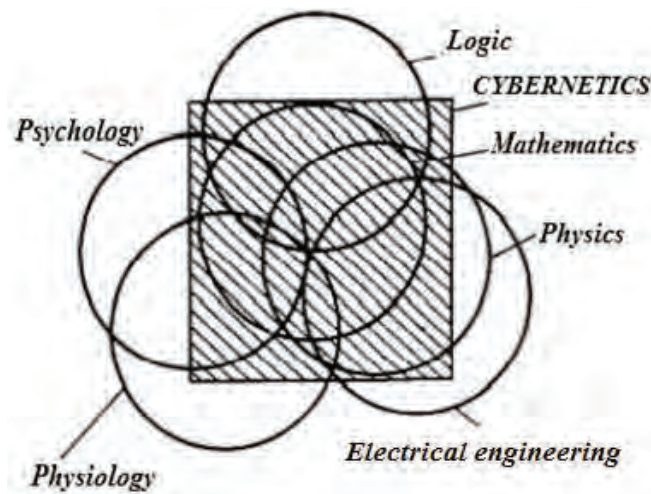


Fig. 1. A schem that roughly illustrates the areas of intersection of the main disciplines that feed cybernetics [4; 11]

The concept behind this was looking at how humans understand our own language and structure of how we form sentences, giving different meaning and rule sets and comparing them to a machine process. The way computers can understand is at a hardware level. This language is written in binary (1s and 0's). This has to be written in a specific format that gives the computer the ruleset to run a particular hardware piece [8].

Minsky's process determined how these artificial neural networks could be arranged to have similar qualities to the human brain. However, he could only produce partial results and needed to further the research into this idea [8].

McCarthy and Shannon's idea behind this theory was to develop a way to use complex problems to determine and measure the machine's efficiency through mathematical theory and computations. However, they were only to receive partial test results [8].

The idea behind self-improvement is how a machine would use self-modifying code to make itself smarter. This would allow for a machine to grow in intelligence and increase calculation speeds. The group believed they could study this if a machine could improve upon the process of completing a task in the abstractions part of their research.

The group thought that research in this category could be broken down into smaller groups. This would consist of sensory and other forms of information about artificial intelligence. Abstractions in computer science can refer to mathematics and programming language.

Their idea of computational creativity is how the program or a machine can be seen in having similar ways of human thinking. They wanted to see if a machine could take a piece of incomplete information and improve upon it to fill [8].

Logic played a significant role in the development of computational sciences. Probably precisely because of the fact that W. Leibniz tried to build a universal calculus with the help of formal logic [2; 16]. Already in the 19th century, Boolean logic was created, which was introduced into computer science as a binary number system. Later, Russell's inductive logic types were developed, which made it possible to describe more complex systems with the help of logic [2; 16]. In the early stages of the development of computer technology, this was enough. The pinnacle of this line of research can be considered Kleene's metamathematics, in which the theory of recursive functions was developed. Russell and Whitehead put logic in the foundations of mathematics. However, Gödel's incompleteness theorems showed the futility of this approach. In the end, it turned out that no single

derivative of modern mathematics can be the basis of all mathematics. In 1948, Whitehead abandoned this concept in favor of an organismic approach. Some believe that Gödel's incompleteness theorems should be included in the theoretical foundations of computer science [2; 16].

The evolution of general theoretical approaches in computer science can be traced on the basis of S. Kleene [20] and S. Wolfram's [21] Metamathematics. If in the first book the main emphasis is on logical doctrine, then in the second book on a group of mathematical disciplines that are basic in computer programs. And that approach is intuitionistic too. However, S. Wolfram points out that it is necessary to bring computer science closer to physics [21].

However, at the current stage of the development of science, this was not enough. The need to shift mathematics to physics was expressed by many people, and even physical cybernetics arose in this way. This leads to the conclusion that it is not worth returning to the Euclid-Newton line in computer science, taking into account all the pros and cons of previous research [2; 16].

We can talk about the convergence of information theory and physics on the basis of the generalized de Broglie ratio [2, 16, 22]

$$\frac{S_a}{\hbar} = \frac{S_e}{k_B} = S_g, \quad (1)$$

about the equality of ordered and disordered information in closed system. Here  $S_a$  is an action,  $S_e$  – entropy,  $\hbar$  – Planck constant,  $k_B$  Boltzmann constant [5; 7; 8]. Therefore, it makes sense to consider dimensionless relations not as elements of dimensionless entropy or action, but as elements of a generalized information [2; 16; 22].

This ratio is valid for closed systems. For open systems, we can formulate the following principle [2; 16]:

$$\delta S_g > 0. \quad (2)$$

If  $S_g = S_e$  we have Shannon law of information theory and Klimontovich criterion of open systems [2; 16].

In addition, relation (1) is the rationale for the introduction of information numerosity (simple, technical and generalized) as the quantifiers of relevant calculation operations, cells as we can see from (1) include relevant quanta of physical processes.

A theory, which include physical and other processes in procedure of computation, can be a polymetric analysis – a theory of variable measure or a theory with a variable hierarchy [1; 2; 16]. The main components of this theory are: functional numbers (generalization of quadratic forms); generalized mathematical transformations (quantitative and qualitative, responsible for single-hierarchical and multi-hierarchical calculations), information grids built on generalized constructive elements (algebraic combination of functional numbers and generalized mathematical transformations). the theory of information calculations, based on the principle of optimal information calculations (mathematical forms may be various, including (2)), the polymetric theory of measure and measurements (synthesis of the theories of measure and analysis of dimensions into a single system) and the hybrid theory of systems (practically systems of possible formalization of knowledge). The theory itself is based on two criteria: the criterion of completeness (the criterion of the layout of the system based on its completeness) and the criterion of simplicity (the criterion of the optimality of this layout, which includes the criterion of the optimal amount of information) [1; 2; 16].

Since the basis of polymetrics is the completeness of the system in a more general sense, as in K. Gödel, and in addition, it is connected with the complexity of the system, then of course the polymetric method can be laid at the basis of computer science. With the help of the hybrid theory of systems, it was possible solve the S. Beer centurial problem in cybernetics (the problem of information complexity). Unlike Russell's inductive logical types, the number of which can be arbitrarily large. in the hybrid theory of systems, the number of types is finite, but the number of implementations can be arbitrarily large [1; 2; 11; 16].



In an epistemological sense, Gödelian completeness and Occam's edge are equivalent to the fourth rule of the Newtonian four rules of inference in physics. However, unlike logic, Newton's fourth law can be applied to almost all sciences without exception. Thus, in computer science, we can move from Leibniz's concept to the more general Euclid-Newton [2; 16].

However, since the polymetric analysis has a variable hierarchy, it is possible to create any number of Kleene or Wolfram-type systems based on it. The approaches of Kleene and Wolfram are inductive, and polymetric analysis is deductive. Therefore, this method can be considered as a deductification of intuitionism as well.

In whole Polymetrical Analysis and possible computer sciences must satisfy six conditions with point of conditions, which are formulated for the general theories (theories of everything) [1; 2; 11; 16]:

1. It must be open theory or theory with variable hierarchy.
2. This theory must be having minimal number of principles.
3. It must based on nature of mathematics (analysis, synthesis and formalization all possible knowledge).
4. We must create sign structure, which unite verbal and nonverbal knowledge (mathematical and other) in one system.
5. We must have system, which is expert system of existing system of knowledge and may be use for the creation new systems of knowledge.
6. Principle of continuity must be true for all science.

These conditions must be used for the creation any dynamic science, which can be presented as open system.

### Conclusions

The problems of evolution in cybernetics and computer sciences are analyzed. Short historical analysis this problem in ancient civilizations is observing.

Role antiquity and middle age scientists in the development of computer science is showing. Role of B. Pascal, W. Leibniz, Ch. Babbage and A. Lovelace researches in the development of computer science is discussing.

Development of logical line of cybernetics and computer science and its limitations is observing. Evolution of intuitionism line in computer science on the example Kleene and Wolfram systems is representing. Short analysis Cybernetics as synthetic system is giving.

We show the necessity of search more universal concept of computer science. This concept is based on six rules. As example of this concept, polymetric analysis is representing.

### Bibliography

1. Trokhimchuk P.P.S. Beer centennial problem in cybernetics and methods of its resolution. *Advanced in computer science* / ed. Mukesh Singla. New Delhi : AkiNik Publications, 2020. Vol. 7. Ch. 5. P. 87–118.
2. Trokhimchuk P.P. Theories of Everything: Past, Present, Future. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2021. 260 p.
3. George F.H. Philosophical Foundations of Cybernetics. London : Abacus Press, 1976. 157 p.
4. George F.H. Foundations of cybernetics. London, Paris, New York : Gordon and Breach Science Publishing 1977. 260 p.
5. Nilsson N.I. The Quest for Artificial Intelligence: A History of Ideas and Achievements. New York : Cambridge University Press, 2010. 562 p.
6. Computer science. *Wikipedia*. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Computer\\_science](http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_science)
7. Computing. *Wikipedia*. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Computing>
8. Nilsson N.I. Artificial Intelligence. A new synthesis. San Francisco : Morgan Kaufman Publishers, Inc., 1998. 514 p.

9. Замуруєва О.В., Кримусь А.С., Ольхова Н.В. Об'єктно-орієнтоване програмування в Python : курс лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2018. Частина 1. 64 с.
10. Замуруєва О.В., Вілігурський О.М. Об'єктно-орієнтоване програмування в Python : курс лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. Частина 2. 72 с.
11. Trokhimchuck P., Viligurskii O., Zamurueva O. Some questions of synthei in cybernetics and computer science. *Applied Problems of Mathematical Modelling*. 2022. Vol. 5. Ch. 2. P. 84–89.
12. Ifrah G. The Universal History of Computing: From the Abacus to the Quantum Computer. New York : John Wiley & Sons, 2021. 416 p.
13. Koetsier T. On the prehistory of programmable machines: musical automata, looms, calculators. *Mechanism and Machine Theory*. 2001. Vol. 36. Is. 5. P. 589–603.
14. Rendall B. From Analytical Engine to Electronic Digital Computer: The Contributions of Ludgate, Torres, and Bush. *Annals of the History of Computing*. 1982. Vol. 4. Is. 4. 20 p.
15. O'Regan G. Introduction to the History of Computing: A Computing History Primer (Undergraduate Topics in Computer Science). Berlin : Springer Verlag, 2016. 317 p.
16. Трохимчук П.П. Математичні основи знань. Поліметричний підхід. 2-е вид. Луцьк : Вежа-Друк, 2014. 624 с.
17. Trentowski B. tounek filozofii do cybernetyki czyli sztuka rzadzenia narodem. Poznan, 1843. 196 s.
18. Кухтенко А.И. Кибернетика и фундаментальные науки. Киев : Наукова Думка, 1987. 144 с.
19. Самойленко Ю.И. Проблемы и методы физической кибернетики. Киев : Ин-т математики НАН Украины, 2006. 644 с.
20. Kleene S.C. Introduction to metamathematics. Amsterdam : North Holland, 1965. 550 p.
21. Wolfram S. Metamathematics: Foundations & Physicalization. Leipzig : Wolfram Media, 2022. 456 p.
22. De Broglie L. Thermodynamics of Isolated Point. The hidden thermodynamics of particles. Paris : Gauthier Villars, 1964. 98 p.
23. History of computer science. *Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_computer\\_science](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_computer_science)

### References

1. Trokhimchuck, P.P.S. (2020). Beer centurial problem in cybernetics and methods of its resolution. *Advanced in computer science / ed. Mukesh Singla*. Vol. 7. Ch. 5. New Delhi : AkiNik Publications. P. 87–118.
2. Trokhimchuck, P.P. (2021). Theories of Everythings: Past, Present, Future. Saarbrukken : Lambert Academic Publishing. 260 p.
3. George, F.H. (1976). Philosophical Foundations of Cybernetics. London : Abacus Press. 157 p.
4. George, F.H. (1977). Foundations of cybernetics. London, Paris, New York : Gordon and Breach Science Publishing. 260 p.
5. Nillson, N.I. (2010). The Quest for Artificial Intelligence: A History of Ideas and Achievements. New York : Cambridge University Press. 562 p.
6. Computer science. *Wikipedia*. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Computer\\_science](http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_science)
7. Computing. *Wikipedia*. URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Computing>
8. Nillson, N.I. (1998). Artificial Intelligence. A new synthesis. San Francisco : Morgan Kauffman Publishers, Inc. 514 p.
9. Zamuruyeva, O.V., Krymus, A.S. & Olkhova, N.V. (2018). Ob'iektno-oriientovane prohramuvannia v Python – [Object-oriented programming in Python] : Course of lectures. Part 1. Lutsk : Vezha-Druk. 64 p. [in Ukrainian]
10. Zamurueva, O.V. & Viligurskyi, O.M. (2020). Ob'iektno-oriientovane prohramuvannia v Python – [Object-oriented programming in Python] : Course of lectures. Part 2. Lutsk : Vezha-Druk. 72 p. [In Ukrainian]

11. Trokhimchuck, P., Viligurskii, O. & Zamurueva, O. (2022). Some questions of synthei in cybernetics and computer science. *Applied Problems of Mathematical Modelling*. Vol. 5. Ch. 2. P. 84–89.
12. Ifrah, G. (2021). *The Universal History of Computing: From the Abacus to the Quantum Computer*. New York : John Wiley & Sons. 416 p.
13. Koetsier, T. (2001). On the prehistory of programmable machines: musical automata, looms, calculators. *Mechanism and Machine Theory*. Vol. 36. Is. 5. P. 589–603.
14. Rendall, B. (1982). From Analytical Engine to Electronic Digital Computer: The Contributions of Ludgate, Torres, and Bush. *Annals of the History of Computing*. Vol. 4. Is. 4. 20 p.
15. O'Regan, G. (2016). *Introduction to the History of Computing: A Computing History Primer (Undergraduate Topics in Computer Science)*. Berlin : Springer Verlag. 317 p.
16. Trokhimchuck, P.P. (2014). *Matematychni osnovy znan. Polimetrychnyi pidkhid – [Mathematical foundations of knowledge. Polymetric approach]*. 2nd edition. Lutsk : Vezha-Druk, 624 p.
17. Trentowski, B. (1843). *The attitude of philosophy to cybernetics, or the art of governing a nation*. Poznan. 196 p.
18. Kukhtenko, A.I. (1987). *Kybernetyka y fundamentalni nauky – [Cybernetics and Fundamental Sciences]*. Kyiv : Naukova Dumka. 144 p.
19. Samoilenko, Yu.I. (2006). *Problemy y metody fizycheskoi kybernetyky – [Problems and methods of physical cybernetics]*. Kyiv : Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 644 p.
20. Kleene, S.C. (1965). *Introduction to metamathematics*. Amsterdam : North Holland. 550 p.
21. Wolfram, S. (2022). *Metamathematics: Foundations & Physicalization*. Leipzig : Wolfram Media. 456 p.
22. De Broglie, L. (1964) *Thermodynamique du point isolé. La thermodynamique cachée des particules*. Paris : Gauthier Villars. 98 p.
23. History of computer science. *Wikipedia*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_computer\\_science](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_computer_science)

Trokhymchuk Petro Pavlovych – PhD, Associate Professor, Associate Professor at Anatoliiy Svidzinskyi Department of Theoretical and Computer Physics of Lesya Ukrainka Volyn National University, e-mail: [tropel650@gmail.com](mailto:tropel650@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2737-0506.

Vilihurskyi Oleh Mykolaiovych – Senior Lecturer at Anatoliiy Svidzinskyi Department of Theoretical and Computer Physics of Lesya Ukrainka Volyn National University, e-mail: [viligurskyi@gmail.com](mailto:viligurskyi@gmail.com).

Zamuruieva Oksana Mykolaivna – PhD, Associate Professor, Associate Professor at Anatoliiy Svidzinskyi Department of Theoretical and Computer Physics of Lesya Ukrainka Volyn National University, e-mail: [zamuraieva@gmail.com](mailto:zamuraieva@gmail.com), ORCID: 0000-0003-0032-0613.

Трохимчук Петро Павлович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки, e-mail: [tropel650@gmail.com](mailto:tropel650@gmail.com), ORCID: 0000-0003-2737-0506.

Вілігурський Олег Миколайович – старший викладач кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки, e-mail: [viligurskyi@gmail.com](mailto:viligurskyi@gmail.com).

Замуруєва Оксана Миколаївна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки, e-mail: [zamuraieva@gmail.com](mailto:zamuraieva@gmail.com), ORCID: 0000-0003-0032-0613.

В.В. ГРИЦИК, В.І. ЗАДОРЖНИЙ  
Національний університет «Львівська політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕОРІЇ ЗОБРАЖЕНЬ: ПОПЕРЕДНЯ ОБРОБКА – ВИДІЛЕННЯ КРАЇВ

Упродовж десятиліть розпізнавання образів та опрацювання зображень зокрема залишається актуальним завданням. Сьогодні ми маємо добре пророблений теоретичний фундамент базових понять, операцій і потребу зіставлення базових операцій передобробки вхідної (початкової) інформації, що допускає ефективне застосування теорії розпізнавання. У роботі автори подають частковий розв'язок, дослідивши можливості десяти операторів виділення країв (контурів), порівнюють поведінку операторів у різних умовах, зокрема умовами є різні значення діапазонів видимого спектру. Видимий спектр поділено на чотири діапазони, які ефективно сприймаються світлочутливою матрицею вебкамери. Ці діапазони відповідають денному освітленню. Досліджено такі оператори: покращення країв за допомогою дискретної різниці (Edge Enhancement by Discrete Differencing), логарифмічне виявлення краю Волліса (Wallis logarithmic edge detection), виявлення країв і ліній Frei-Chen (Frei-Chen edge and line detection), детектор краю Кірша (Kirsch Edge detector), спрямоване визначення краю (Directional edge detection), добуток різниці середніх (Product of the difference of averages), виявлення країв тріщин (Crack Edge detection), виявлення країв Марра-Хілдрета (Marr-Hildreth edge detection), виявлення локального краю в тривимірних зображеннях (Local Edge Detection in three-dimensional images), виявлення ієрархічного краю (Hierarchical edge detection). Для проведення досліджень розроблено систему адаптивного пошуку оптимального детектора краю зображення відповідно до рівня освітлення. Ця система призначена для роботи з веб-камерою персонального комп'ютера або смартфона, виділення на ній об'єктів і в подальшому накладення на них фільтрів. У кінцевому підсумку система буде підбирати для певного освітлення найкращий метод, який було визначено. Подано методи й результати. Робота охоплює розробку й застосування методів виділення країв для виявлення суттєвих ознак та особливостей на зображеннях, використовуючи адаптивний підхід, на відміну від усталеної послідовності попередньої обробки. Завдання, розв'язані під час проведення дослідження: реалізовано методи виділення ключових характеристик об'єкта; реалізовано частину аналітичного ядра з об'єктивною оцінкою, яка є кращою за MSE та PSNR і їх найближчих варіацій, зокрема використано індекс структурної схожості (SSIM). Реалізовано частину аналітичного ядра з прийняття рішення за результатами об'єктивного оцінювання, що дало змогу адаптивно визначати оптимальний алгоритм знаходження об'єктів у полі уваги, створена база векторів-еталонів людського сприйняття об'єктів, розроблено навчальний складник під час навчання комп'ютерного зору людських понять образів цифр.

Ключові слова: порівняння, виділення контурів на зображеннях, комп'ютерний зір.

V.V. HRYTSYK, V.I. ZADOROZHNI  
Lviv Polytechnic National University

## RESEARCH OF IMAGE THEORY: PREPROCECION – EDGE DETECTORS

For decades, pattern recognition and image processing, in particular, has remained an urgent task. Today we have a well-developed theoretical foundation of basic concepts, operations and the need to comparison of basic refining operations of the input (initial) information, which allows the effective application of the theory of recognition. In the paper, the authors present a partial solution, having investigated the possibilities of ten operators for selecting edges (contours). The work compares the behavior of operators in different conditions. In particular, the conditions are different values of the ranges of the visible spectrum. The visible spectrum is divided into four bands, which are effectively perceived by the light-sensitive matrix of the webcam. These ranges correspond to different spectrums of daylight. The following operators were investigated in the work: Edge Enhancement by Discrete Differentiating, Wallis logarithmic edge detection, Frei-Chen edge and line detection, edge detector Kirsch Edge detector, Directional edge detection, Product of the difference of averages, Crack Edge detection, Marr-Hildreth edge detection, local edge detection in three-dimensional images (Local Edge Detection in three-dimensional images), hierarchical edge detection (Hierarchical edge detection). To conduct research, a system of adaptive search for the optimal image edge detector according to the level of illumination has been developed. This system is designed to work with a web camera of a personal computer or smartphone, selecting objects on it and then applying filters to them. As a result, the system will select the best method that has been determined for certain lighting. Methods and results are presented in the paper. The work covers the development and application of edge extraction methods to detect significant features and features in images using an adaptive approach as opposed to a fixed sequence of pre-processing. The tasks were solved during the research: the methods of identifying the key characteristics of the object were implemented; implemented a part of the analytical

core with an objective estimate that is better than MSE and PSNR and their nearest variations. In particular, the structural similarity index (SSIM) was used. A part of the analytical core for making a decision based on the results of an objective evaluation was implemented, which allowed adaptively determining the optimal algorithm for finding objects in the field of attention, a database of reference vectors of human perception of objects was created, and an educational component was developed for training computer vision with human concepts images of numbers.

Key words: evaluation, edge detectors, computer vision.

### Постановка проблеми

Метою роботи є дослідження можливості/ефективності застосування КЗ з адаптивним пошуком ключових характеристик – країв без попередньої скелетизації, зокрема, у порівнянні ефективності різних методів пошуку ключових характеристик порівняно з традиційним застосуванням уставленого механізму передобробки. Більш детально дослідження можна описати через визначення його складників. Отже, дослід, який ми очікуємо побачити, повинен володіти такими функціями:

- адаптивний пошук корисних ознак;
- обробка та виявлення країв зображення;
- опрацювання зображення 10 методами;
- виявлення найкращого методу для певного рівня освітлення;
- автоматизація процедури адаптації.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Упродовж десятиліть опрацювання образів [1] і зображень [2] зокрема залишається актуальним завданням [3].

Підґрунтям до цього є, по-перше, те, що візуальний спектр – це основне джерело інформації; по-друге, те, що технології постійно покращуються (спочатку бінарні зображення, потім градації сірості, потім кольорові, потім кольорові з поглибленою палітрою, а в разі переходу на одноатомні процесори ситуація знову кардинально зміниться). Проблема синхронізації роботи розподілених по всьому світу команд є лише додатковим аргументом необхідності уніфікації представлення множин та операцій над ними. Концепція адаптивного пошуку ключових характеристик використовує методи виділення ключових характеристик – виділення ліній, які дають змогу знаходити суттєві ознаки й особливості без необхідності в явній обробці структури об'єкта [4]. Зберігаючи еталони, система навчається визначати характеристики, які найкраще описують об'єкти на зображеннях, шляхом аналізу великого обсягу даних.

Цей підхід має великий потенціал у багатьох сферах, включаючи медицину [5], робототехніку, безпеку тощо. Застосовуючи систему адаптивного пошуку ключових характеристик, ми можемо досягти нових рівнів точності й ефективності в розпізнаванні об'єктів та аналізі зображень.

У роботі автори досліджують можливості цієї системи та її потенційні переваги порівняно з традиційними методами комп'ютерного зору. Використовуючи новітні алгоритми й технології, автори прагнуть зробити крок уперед у розвитку комп'ютерного зору, щоб створити більш ефективні та надійні системи для аналізу зображень у різних сферах життя.

Праця пропонує захопливі можливості дослідження й інновацій у галузі комп'ютерного зору. Реалізація цієї системи розкриває нові перспективи цього підходу та його потенціал для вирішення складних завдань у сучасному цифровому світі.

Актуальність дослідження надзвичайно висока в сучасному світі, де зображення та відео є одними з основних джерел інформації та великої кількості даних [6].

Уведемо визначення кількох завдань, які розв'язані в процесі основного дослідження.

Комп'ютерний зір – це галузь штучного інтелекту й обробки зображень, яка займається обробкою, аналізом і розумінням візуальної інформації з використанням комп'ютерних алгоритмів і методів. Вона включає розробку алгоритмів і систем, які дають змогу комп'ютерам «бачити» й розуміти зображення та відео так само, як це роблять люди [7].

Розпізнавання об'єктів – це завдання комп'ютерного зору, яке полягає в ідентифікації та класифікації об'єктів на зображеннях або відео [8].

Існує кілька способів вирішення завдання, що розглядається [9]:

– класифікація на основі ознак, таких як локальні шаблони (LBP), орієнтовані градієнти густини (HOG), регресія, кластеризація, зменшення вимірності [10] тощо. Для простого оцінювання якості можна використати PSNR або MSE, а для складніших завдань застосовують нейронні мережі з передачею ваг: використання попередньо навчених нейронних мереж, таких як Convolutional Neural Networks (CNN), із передачею ваг, які попередньо навчені на великих наборах даних, таких як ImageNet. Цей підхід, відомий як передача навчання, дає змогу використовувати ваги, набуті на великому наборі даних [11], для ефективного розпізнавання об'єктів на нових зображеннях [12];

– для виявлення й класифікації також використовують спеціалізовані детектори об'єктів, такі як Single Shot MultiBox Detector (SSD), You Only Look Once (YOLO) або Region-based Convolutional Neural Networks (R-CNN);

– комбінація методів: часто ефективним є комбінація декількох методів розпізнавання об'єктів. Наприклад, можна поєднати детектор об'єктів для локалізації ділянки інтересу на зображенні з класифікатором на основі ознак для ідентифікації конкретних об'єктів.

Звичайно, це не вичерпний перелік, але вони представляють деякі з популярних та ефективних методів для розпізнавання об'єктів. Вибір конкретного підходу залежить від конкретного завдання, доступності даних і ресурсів, а також від вашої експертизи в цій галузі.

### Мета дослідження

**Метою дослідження** є вивчення можливості/ефективності застосування КЗ з адаптивним пошуком ключових характеристик – країв без попередньої скелетизації.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Для розв'язання поставленого завдання першим кроком проведемо огляд підходу розпізнавання об'єктів, що базується на оцінюванні виділення корисних ознак (ліній) у конкретних діапазонах виділеного спектру, може бути реалізована з використанням методів обробки сигналів. Загальний опис:

1. Виділення спектру: спочатку виконується процес виділення спектральної інформації з об'єктів, яку зазвичай здійснюють з допомогою спектральних сенсорів або спектрографічних методів. Це може бути виконано, наприклад, за допомогою спектральної фотографії, гіперспектрального зображення або спектрального аналізу сигналів [13].

2. Сегментація та виділення діапазонів: після отримання спектральних даних застосовується процес сегментації, який розділяє спектральну інформацію на окремі діапазони або канали відповідно до визначених параметрів. Наприклад, це можуть бути конкретні діапазони довжини хвилі чи фільтри для виділення певних спектральних характеристик [9].

3. Виділення корисних ознак: на цьому етапі застосовуються алгоритми й методи для оцінювання виділення корисних ознак (ліній) у кожному діапазоні. Це може включати методи обробки сигналів, аналізу характеристик і визначення структури. Наприклад, можуть застосовуватися фільтри Габора [14], перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз або інші методи для виділення конкретних ознак [15].

4. Використання класифікатора: отримані корисні ознаки можуть бути використані для навчання та використання класифікатора, який здатний розпізнавати й класифікувати об'єкти відповідно до заданих класів або категорій. Для цього можуть використовуватися методи машинного навчання, такі як нейронні мережі, метод опорних векторів (SVM), рішучі дерева тощо.

5. Оптимізація та налаштування: в процесі розпізнавання й класифікації об'єктів для конкретних діапазонів спектру може бути потрібна оптимізація та налаштування параметрів, щоб

досягти кращої точності й надійності. Це може включати оптимізацію параметрів класифікатора, підбір оптимальних методів виділення ознак і попередню обробку спектральних даних.

У роботі досліджено поведінку 10 методів пошуку країв:

Edge Enhancement by Discrete Differencing. Цей метод використовує дискретне диференціювання для підсилення країв на зображенні. Він обчислює різницю значень сусідніх пікселів у зображенні, що вказує на зміну яскравості. Це може бути здійснено, наприклад, шляхом використання оператора Собеля або оператора Робертса.

Wallis logarithmic edge detection. Основна ідея методу полягає у використанні логарифмічного перетворення для покращення візуальної якості зображення й виділення границь об'єктів. Логарифмічне перетворення зображення зменшує контраст і згладжує яскравість, даючи змогу краще виділяти різницю між пікселями на границі об'єктів.

Алгоритм Wallis логарифмічного виявлення граней складається з таких кроків:

1. Конвертація зображення в градації сірого (grayscale).
2. Застосування логарифмічного перетворення до градацій сірого зображення.
3. Використання фільтра вишукування (enhancement filter), такого як фільтр Гаусса, для подальшого покращення контрасту.
4. Застосування оператора виявлення граней, наприклад, оператора Собеля або оператора Робертса, для виділення контурів об'єктів.
5. Порогова обробка для відокремлення границь від решти зображення.
6. Опрацювання й інтерпретація результатів виявлення граней залежно від конкретних потреб застосування.

Метод Wallis логарифмічного виявлення граней дає змогу підкреслити границі об'єктів на зображенні, сприяючи поліпшенню їх візуальної якості й подальшому аналізу або обробці. Він може бути використаний у різних галузях, включаючи комп'ютерне зорове сприйняття, обробку зображень, розпізнавання образів та інші завдання, де важливо виділити контури об'єктів.

Frei-Chen edge and line detection. Цей метод базується на використанні операцій згортки й масок, що використовуються для оцінювання градієнта яскравості пікселів і визначення наявності границь. Алгоритм Frei-Chen може бути застосований до зображень у градаціях сірого або кольору.

Основні кроки методу Frei-Chen включають таке:

1. Конвертацію зображення в градації сірого (або розбиття на окремі канали RGB для кольорових зображень).
2. Застосування масок Frei-Chen до градацій сірого зображення для обчислення градієнта яскравості пікселів. Ці маски використовуються для оцінювання градієнта восьми напрямків.
3. Обчислення магнітуди градієнта, що вказує на силу границь на зображенні.
4. Застосування порогової обробки для відокремлення границь від решти зображення. Це допомагає виділити значущі границі та лінії.
5. Подальша обробка результатів, така як підсилення контурів або відкидання шуму, може бути застосована для поліпшення якості виявлення границь.

Метод Frei-Chen виявлення граней і ліній є популярним у багатьох галузях, де важливо виділити границі й лінії на зображеннях. Його застосовують у комп'ютерному зорі, обробці зображень, розпізнаванні образів, візуальній навігації, а також у багатьох інших галузях, де важливо аналізувати й використовувати границі та лінії в зображеннях.

Kirsch Edge detector. Алгоритм Кірша базується на використанні масок або ядер, що мають вагові коефіцієнти, для оцінювання градієнта яскравості пікселів. Ці маски розроблені для визначення напрямку та сили границь на зображенні.

Основні кроки алгоритму Кірша включають таке:

1. Конвертацію зображення в градації сірого (або окремі канали RGB для кольорових зображень).

2. Використання восьми масок Кірша, кожна з яких відповідає певному напрямку границі ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  і їх обернені напрямки). Кожна маска має вагові коефіцієнти, які використовуються для згортки зображення.

3. Згортка кожної маски з градаціями сірого зображення для отримання вагованих значень градієнта на кожному пікселі.

4. Обчислення магнітуди градієнту шляхом узяття максимального значення серед вагованих градієнтів для кожного напрямку.

5. Застосування порогової обробки для відокремлення границь від решти зображення.

6. Подальша обробка результатів, така як підсилення контурів або відкидання шуму, може бути застосована для поліпшення якості виявлення границь.

Алгоритм Кірша виявлення граней є ефективним і широко використовується в галузі комп'ютерного зору, обробки зображень, розпізнавання образів і багатьох інших галузях, де важливо виділити границі на зображеннях. Він дає змогу точно виявляти границі в різних напрямках і сприяє поліпшенню якості аналізу й обробки зображень.

Directional edge detection є технікою обробки зображень, яка спрямована на виявлення границь об'єктів залежно від їх напрямку або орієнтації. Цей підхід дає змогу виділити грані зображення в певних заданих напрямках або визначити орієнтацію границі.

Основні кроки в методі виявлення граней за напрямком можуть включати таке:

1. Конвертацію зображення в градації сірого (або окремі канали RGB для кольорових зображень).

2. Визначення напрямку або орієнтації грані, яку необхідно виявити. Це може бути вказано як конкретний кут (наприклад,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ) або як діапазон кутів.

3. Застосування фільтра або маски, що відповідає заданому напрямку грані. Цей фільтр зазвичай має вагові коефіцієнти, які використовуються для згортки зображення.

4. Згортка вхідного зображення зі спеціальною маскою для виділення границь у заданому напрямку. Цей крок зазвичай включає згортку з використанням оператора, такого як оператор Собеля або оператор Прюїтта.

5. Використання порогової обробки для відокремлення границь від решти зображення.

6. Подальша обробка результатів, така як підсилення контурів або відкидання шуму, для поліпшення якості виявлення границь за заданим напрямком.

Застосування виявлення граней за напрямком може бути корисним для різних завдань обробки зображень, таких як розпізнавання об'єктів, сегментація зображень, аналіз текстур, реконструкція 3D моделей тощо. Цей метод дає змогу вибірково виявляти грані в заданих напрямках, що розширює можливості аналізу зображень та обробки інформації про форму й орієнтацію об'єктів.

Product of the difference of averages є методом обробки зображень, який використовується для виявлення граней і контурів на зображеннях. Цей метод базується на обчисленні різниці середніх значень пікселів у двох різних регіонах зображення та їх подальшого множення.

Основні кроки методу PODA включають таке:

1. Розділення зображення на два різні регіони або вікна. Ці регіони можуть бути вибрані випадково або заздалегідь визначені залежно від конкретного застосування.

2. Обчислення середнього значення пікселів у кожному з регіонів.

3. Обчислення різниці між середніми значеннями пікселів у двох регіонах.

4. Множення різниці середніх значень пікселів на зображенні. Це дає карту, де великі значення вказують на наявність границь або контурів.

5. Застосування порогової обробки до отриманої карти для виділення значущих границь або контурів і позбавлення від шуму.

6. Подальша обробка результатів, така як підсилення контурів або з'єднання розривів, може бути застосована для поліпшення якості виявлення границь і контурів.



Метод PODA є простим, але ефективним способом виявлення граней і контурів на зображеннях. Його застосовують у багатьох галузях, включаючи комп'ютерний зір, обробку зображень, розпізнавання образів, сегментацію та аналіз зображень, а також візуальну навігацію тощо.

Crack Edge detection є методом обробки зображень, спрямованим на виявлення й виділення границь або контурів тріщин на поверхнях або структурах. Цей метод використовується в різних галузях, таких як інженерія, геологія, контроль якості матеріалів, візуальний інспекційний аналіз тощо.

Основні кроки виявлення крайок тріщин можуть включати таке:

1. Підготовку зображення: зображення, на якому необхідно виявити крайки тріщин, піддається попередній обробці, такій як фільтрація шуму або видалення несуттєвої інформації. Це може бути досягнуто за допомогою фільтрів, таких як фільтр Гауса або медіанний фільтр.

2. Вибір методу виявлення крайок: існує багато різних методів, які можуть бути використані для виявлення крайок тріщин. Це може включати методи, такі як оператори Собеля, оператори Канні, методи, засновані на морфологічних операціях, або алгоритми, що використовують нейронні мережі.

3. Застосування методу виявлення крайок: обробка зображення з використанням обраного методу виявлення крайок тріщин. Це включає використання операцій градієнту, порогової обробки й інших операцій для виділення границь або контурів, які вказують на наявність тріщин.

4. Постобробка результатів: отримані границі або контури тріщин можуть бути піддані подальшій обробці для підсилення, з'єднання, фільтрації шуму або видалення непотрібних деталей.

Метод виявлення крайок тріщин залежить від специфіки застосування й може варіюватися залежно від вхідних даних і вимог до точності й ефективності. Використання такого методу дає змогу автоматизувати процес виявлення тріщин, поліпшити ефективність і точність оцінювання, допомагає уникнути можливих негативних наслідків, пов'язаних із тріщинами в різних доменах.

Marr-Hildreth edge detection. Цей метод використовує лапласіан фільтрацію та оператор гаусіанського згладжування для виявлення країв на зображенні. Спочатку зображення згладжується за допомогою гаусіанського фільтра, а потім застосовується оператор лапласіана для виділення країв.

Local Edge Detection in three-dimensional images. Цей метод застосовують для виявлення країв у тривимірних зображеннях. Він може використовувати комбінацію тривимірного фільтрування, градієнтних методів і порогової обробки, щоб виділити краї об'єктів у третьому розмірі.

Hierarchical edge detection. Цей метод використовує ієрархічний підхід до виявлення країв на зображенні. Він розглядає зображення на різних масштабах і різній роздільній здатності, що дає змогу виявляти краї різних розмірів і деталей на зображенні.

Як порівняльну процедуру використано метод SSIM (метод структурної подібності). За частину графічного інтерфейсу відповідає бібліотека CV2, вона дає можливість аналізувати зображення, розпізнавати об'єкти та взаємодіяти з веб-камерою.

Для кращої візуалізації експериментів подамо діаграму потоків даних. Діаграма потоків даних – це така діаграма, що використовується для моделювання й опису потоків даних у системі. Вона допомагає візуалізувати, як дані рухаються через систему, як вони обробляються та як взаємодіють компоненти системи між собою та із зовнішніми сутностями (рис. 1).

На цій діаграмі зображено, що все починається із запиту користувача на вхід у систему. Після цього йому потрібно вибрати, що далі він хоче зробити: створити еталони чи відфільтровані зображення. Після створених відфільтрованих зображень відбудеться формування результатів порівнянь, які в подальшому обрахуються, визначиться найкращий із них, усі дані перевіряються з таблицею результатів, потім можна переглянути результати найкращих методів.

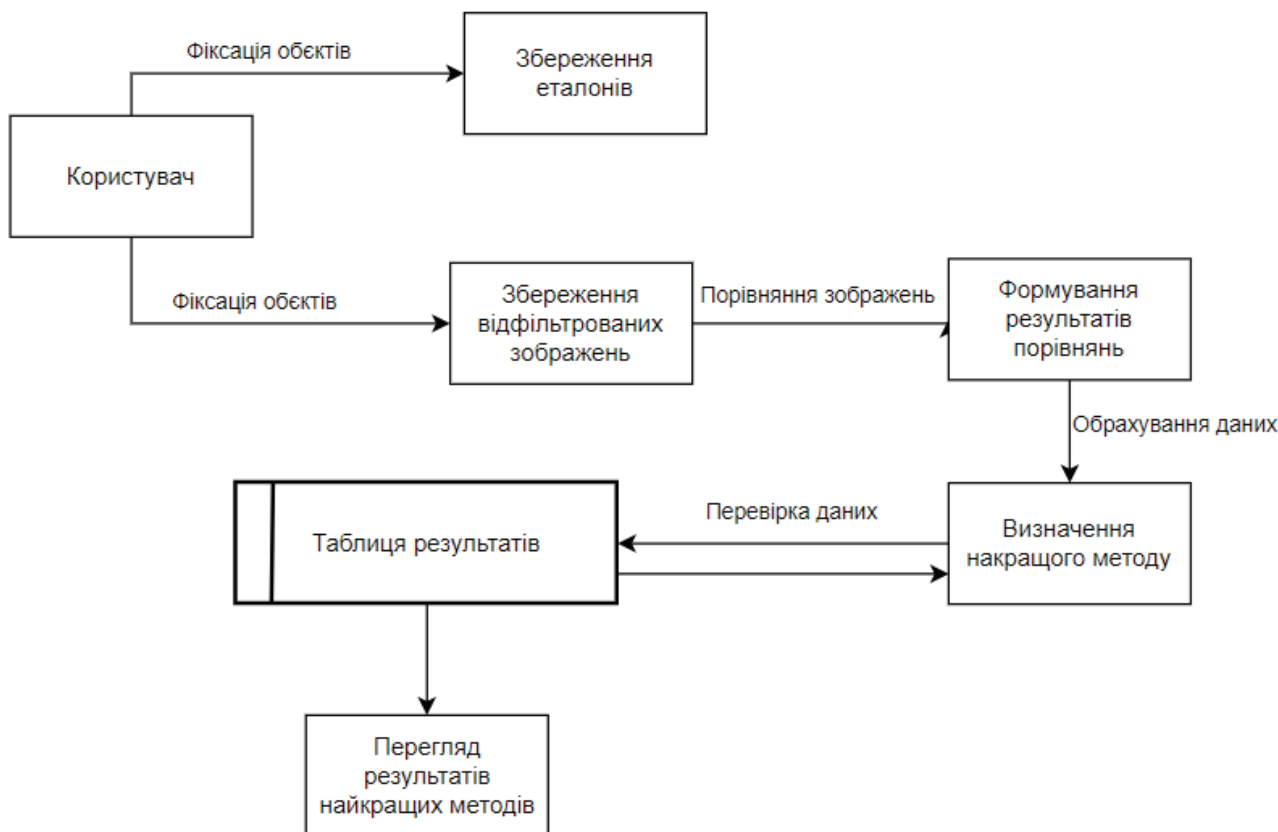


Рис. 1. Діаграма потоків даних

Результати можна побачити на рисунку 2, де в перший стовпець «Brightness» записується тип освітлення, у другий стовпець «Brightness value» записується значення освітлення, в третьому – «Etalon» записується назва еталону, з яким порівнювали. У стовпцях, які залишилися, записують результати порівнянь.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	
1	Brightness	Brightness	Etalon	filter/0/crc filter/0/dir filter/0/led filter/0/fre filter/0/hic filter/0/kir filter/0/loc filter/0/mi filter/0/pd filter/0/lwe filter/1/crc filter/1/dir filter/1/led filter/1/fre filter/1/hic filter/1/kir filter/1/loc filter/1/mi filter/1/pd filter/1/lwe	0,049732	0,110566	0,116115	0,122229	0,029928	0,031096	0,126802	0,075115	0,13493	0,122404	0,034309	0,039833	0,040035	0,040467	0,076058	0,016009	0,073615	0,096722	-0,00133	0,087681
2	Bright	129,6967	test/0.jpg	0,00975	0,016804	0,019425	0,104424	0,058575	0,005249	0,085523	0,081771	-0,00116	0,074488	0,059591	0,09869	0,095624	0,11833	0,051762	0,016767	0,11318	0,087619	0,005358	0,134856	
3	Bright	129,6967	test/1.jpg	0,00975	0,016804	0,019425	0,104424	0,058575	0,005249	0,085523	0,081771	-0,00116	0,074488	0,059591	0,09869	0,095624	0,11833	0,051762	0,016767	0,11318	0,087619	0,005358	0,134856	
4	Bright	129,6967	test/2.jpg	0,026268	0,030181	0,032005	0,057315	0,059521	0,015393	0,082883	0,08037	0,008721	0,070838	0,041919	0,048463	0,048044	0,079702	0,084924	0,013446	0,095156	0,101241	0,001672	0,090761	
5	Bright	129,6967	test/3.jpg	-0,00958	-0,00417	-0,00135	0,062	0,042808	-0,00692	0,060655	0,070495	-0,01672	0,048947	0,004588	0,010189	0,013071	0,05739	0,061038	-0,01211	0,076456	0,08905	-0,0126	0,067342	
6	Bright	129,6967	test/4.jpg	0,014528	0,007297	0,008692	0,049861	0,038069	0,010615	0,056928	0,063406	-0,0011	0,032035	0,064874	0,062375	0,063098	0,063502	0,064533	0,044192	0,091656	0,080539	-0,00119	0,076924	
7	Bright	129,6967	test/5.jpg	-0,02038	-0,01407	-0,01279	0,01477	0,020075	-0,01818	0,019856	0,036984	-0,00302	0,020627	0,02339	0,024897	0,026073	0,035429	0,036489	0,016642	0,038559	0,047125	-0,00423	0,045006	
8	Bright	129,6967	test/6.jpg	0,142203	0,131556	0,135499	0,15302	0,160604	0,0701	0,179794	0,185658	0,02169	0,180301	0,135561	0,13274	0,131775	0,161083	0,164715	0,071383	0,167479	0,19663	0,01402	0,186366	
9	Bright	129,6967	test/7.jpg	0,010422	0,006491	0,008854	0,007877	0,037724	0,012001	0,02567	0,063635	-0,01243	0,037427	0,028556	0,029194	0,030086	0,04579	0,055576	0,013733	0,054441	0,076299	0,010279	0,057897	
10	Bright	129,6967	test/8.jpg	0,034504	0,041371	0,042043	0,036878	0,053302	0,031521	0,07233	0,076459	0,00549	0,073698	0,061118	0,056653	0,057851	0,096304	0,075094	0,035013	0,097497	0,093126	0,015862	0,077532	

Рис. 2. Результати порівнянь записані в Excel файл

На рисунку 3 зображена таблиця, у яку записані дані порівнянь зображення за типу освітлення «Світло», значення якого дорівнює 129.

11	Very bright	120,0142	test/0.jpg	0,071051	0,128383	0,134053	0,139571	0,044114	0,050568	0,113896	0,083111	0,016159	0,123241	0,044804	0,048121	0,048446	0,051206	0,083442	0,020837	0,081103	0,104282	0,010277	0,088722
12	Very bright	120,0142	test/1.jpg	0,016505	0,020124	0,024193	0,107257	0,064868	0,008251	0,088815	0,088731	0,003415	0,065488	0,065784	0,096237	0,096524	0,115959	0,06239	0,018209	0,09521	0,09738	0,007723	0,131243
13	Very bright	120,0142	test/2.jpg	0,024753	0,029442	0,032173	0,059003	0,063702	0,012284	0,084127	0,083344	-0,00437	0,06925	0,04505	0,049342	0,048365	0,083928	0,084512	0,013335	0,099257	0,101564	-0,00575	0,088645
14	Very bright	120,0142	test/3.jpg	-0,00861	-0,00038	0,00365	0,067405	0,04849	-0,00493	0,06769	0,077415	-0,01313	0,041648	0,01699	0,019318	0,023059	0,06244	0,066726	-0,00108	0,086646	0,093415	-0,01792	0,066031
15	Very bright	120,0142	test/4.jpg	0,013157	0,007143	0,00938	0,053048	0,043286	0,010734	0,060201	0,069033	-0,0014	0,023697	0,073864	0,07047	0,071089	0,070811	0,067263	0,050769	0,095367	0,083917	0,002903	0,075473
16	Very bright	120,0142	test/5.jpg	-0,0146	-0,00904	-0,0075	0,019002	0,024688	-0,01082	0,024486	0,042976	-0,00478	0,018168	0,0309	0,03209	0,033205	0,044811	0,045361	0,019122	0,047869	0,057478	-0,00345	0,048732
17	Very bright	120,0142	test/6.jpg	0,143158	0,137271	0,141953	0,158349	0,167737	0,074774	0,185762	0,19228	0,023078	0,178919	0,140352	0,137298	0,136824	0,165763	0,16951	0,078003	0,171932	0,200189	0,006866	0,184746
18	Very bright	120,0142	test/7.jpg	0,005951	0,008143	0,010508	0,010718	0,039528	0,012563	0,030636	0,067237	0,003826	0,021054	0,032578	0,03441	0,034955	0,05462	0,059896	0,019364	0,06306	0,081243	-0,0009	0,062385
19	Very bright	120,0142	test/8.jpg	0,040316	0,04261	0,044166	0,04112	0,063646	0,036177	0,074244	0,086674	0,012444	0,065624	0,067956	0,063962	0,064475	0,10485	0,082669	0,042282	0,104983	0,100234	0,026197	0,084436

Рис. 3. Результати порівнянь записані в Excel файл за певного типу освітлення

На рисунку 4 записані дані під час експерименту для типу освітлення «Дуже світло», усі дані записані у відповідні для них стовпці.

20	Dark	113,0655	test/0.jpg	0,005791	0,032018	0,033893	0,033535	0,050579	-0,00816	0,037895	0,078515	-0,00658	0,077272	0,011363	0,008947	0,010711	0,004844	0,063114	-0,00824	0,04595	0,08483	0,009021	0,072818
21	Dark	113,0655	test/1.jpg	0,008398	0,020112	0,021346	0,092941	0,050431	0,002094	0,072565	0,073422	0,004432	0,063072	0,024816	0,05404	0,053834	0,063312	0,059452	-0,01213	0,052841	0,085104	0,004496	0,091189
22	Dark	113,0655	test/2.jpg	0,035494	0,032266	0,033829	0,044822	0,053725	0,019071	0,067178	0,076834	-0,00308	0,054451	0,052663	0,046382	0,047216	0,063139	0,071916	0,026003	0,083235	0,085156	0,006137	0,077437
23	Dark	113,0655	test/3.jpg	-0,01493	-0,00998	-0,00872	0,05483	0,043032	-0,01641	0,054329	0,069206	0,000823	0,039185	0,012758	0,022112	0,025624	0,054418	0,058298	0,002043	0,06271	0,082502	-0,00558	0,057054
24	Dark	113,0655	test/4.jpg	-0,01459	-0,00906	-0,0095	0,04386	0,036046	-0,01859	0,038578	0,060774	-0,00399	0,040846	0,046938	0,046174	0,046684	0,045965	0,057967	0,024616	0,070585	0,071616	-0,00176	0,069762
25	Dark	113,0655	test/5.jpg	-0,00067	0,003882	0,00693	0,005854	0,017691	-0,00059	0,011678	0,032859	-0,02404	0,019514	0,015374	0,015612	0,016756	0,022024	0,030075	0,009428	0,026332	0,039213	-0,00722	0,032323
26	Dark	113,0655	test/6.jpg	0,112105	0,100613	0,102302	0,115462	0,151724	0,038937	0,153719	0,180888	0,00414	0,159231	0,131331	0,113478	0,11489	0,133261	0,166202	0,046624	0,144388	0,19572	0,011446	0,169365
27	Dark	113,0655	test/7.jpg	-0,02695	-0,02224	-0,02198	-0,00921	0,034526	-0,0332	-0,00443	0,061186	-0,02205	0,024397	0,028945	0,023995	0,025317	0,030857	0,050674	0,014073	0,039694	0,068993	-0,00722	0,051486
28	Dark	113,0655	test/8.jpg	0,014196	0,021128	0,022611	0,024339	0,051457	-6,5E-05	0,039391	0,073701	0,003645	0,065595	0,055829	0,045266	0,046874	0,069114	0,066748	0,027869	0,074616	0,082545	0,028145	0,077709

Рис. 4. Результати порівнянь записані в Excel файл за певного типу освітлення

На рисунку 5 зображена табличка з даними для рівня освітлення «Темно», рівень освітлення якого дорівнює 113, дані записані на основі порівнянь 10 методів та еталонних зображень.

29	Very dark	96,8	test/0.jpg	0,023406	0,064816	0,069553	0,100334	0,035043	-0,01406	0,088888	0,06461	0,028696	0,104823	0,002431	-0,00288	-0,0046	0,009201	0,069775	-0,0113	0,045964	0,083063	0,015168	0,045082
30	Very dark	96,8	test/1.jpg	-0,00459	0,006949	0,011144	0,079705	0,05802	-0,00068	0,063898	0,071545	-0,00545	0,053384	0,025926	0,041686	0,037164	0,08601	0,070676	-0,02361	0,084038	0,088903	0,004681	0,110223
31	Very dark	96,8	test/2.jpg	0,011591	0,012162	0,015625	0,032485	0,057443	0,002633	0,053406	0,068518	-0,01821	0,036849	0,040283	0,021409	0,019906	0,045648	0,078653	0,007461	0,070418	0,086397	-0,02688	0,067147
32	Very dark	96,8	test/3.jpg	-0,03478	-0,03399	-0,02843	0,04348	0,049642	-0,04784	0,039596	0,063759	-0,023	0,009444	-0,00184	-0,00375	-0,003	0,047069	0,066564	-0,02021	0,057904	0,08044	-0,0039	0,039894
33	Very dark	96,8	test/4.jpg	-0,00773	-0,00939	-0,00778	0,036353	0,040633	-0,01928	0,048444	0,055872	0,002417	0,0107	0,024258	0,020341	0,017281	0,02697	0,062185	0,002122	0,054885	0,07042	0,002176	0,048232
34	Very dark	96,8	test/5.jpg	-0,03184	-0,03102	-0,02687	0,003263	0,020063	-0,03924	0,012608	0,031017	-0,01107	0,000699	0,011124	0,006697	0,007438	0,016179	0,030889	8,93E-05	0,021482	0,037217	0,002336	0,018606
35	Very dark	96,8	test/6.jpg	0,133361	0,094941	0,101518	0,105124	0,165954	0,048079	0,139464	0,187376	0,012868	0,162098	0,125936	0,069814	0,063614	0,108971	0,182394	0,031587	0,134392	0,202777	0,003513	0,144702
36	Very dark	96,8	test/7.jpg	0,001889	-0,00304	-0,00018	-0,01387	0,041413	-0,00478	0,006658	0,058565	-0,02477	0,014927	0,022169	0,009726	0,00977	0,018902	0,058076	0,003205	0,029973	0,069383	0,007929	0,027574
37	Very dark	96,8	test/8.jpg	0,013968	0,017525	0,020387	0,0183	0,055038	0,007596	0,059696	0,068593	-0,00177	0,059284	0,056447	0,030284	0,031155	0,062906	0,07829	0,028966	0,074984	0,086006	0,00154	0,060098

Рис. 5. Результати порівнянь записані в Excel файл за певного типу освітлення

На цьому рисунку зображені дані для рівня освітлення «Дуже темно». Таким чином, світловий день поділено на 4 частини, кожна з яких відповідає певному діапазону видимого спектру. Для кожного діапазону (за постановкою завдання) передбачався «свій» оптимальний метод. Для контролю використовували «ручне» виділення ліній. Іншими словами, еталоном слугує людське сприйняття сцени. Це має створити адаптивність системи до зовнішніх умов як елемент адаптивності системи на рівні передобробки.

У роботі проведемо порівняльне дослідження методів виділення границь. Графічно об'єднано результати за всіма дослідими подано на рисунку 6.

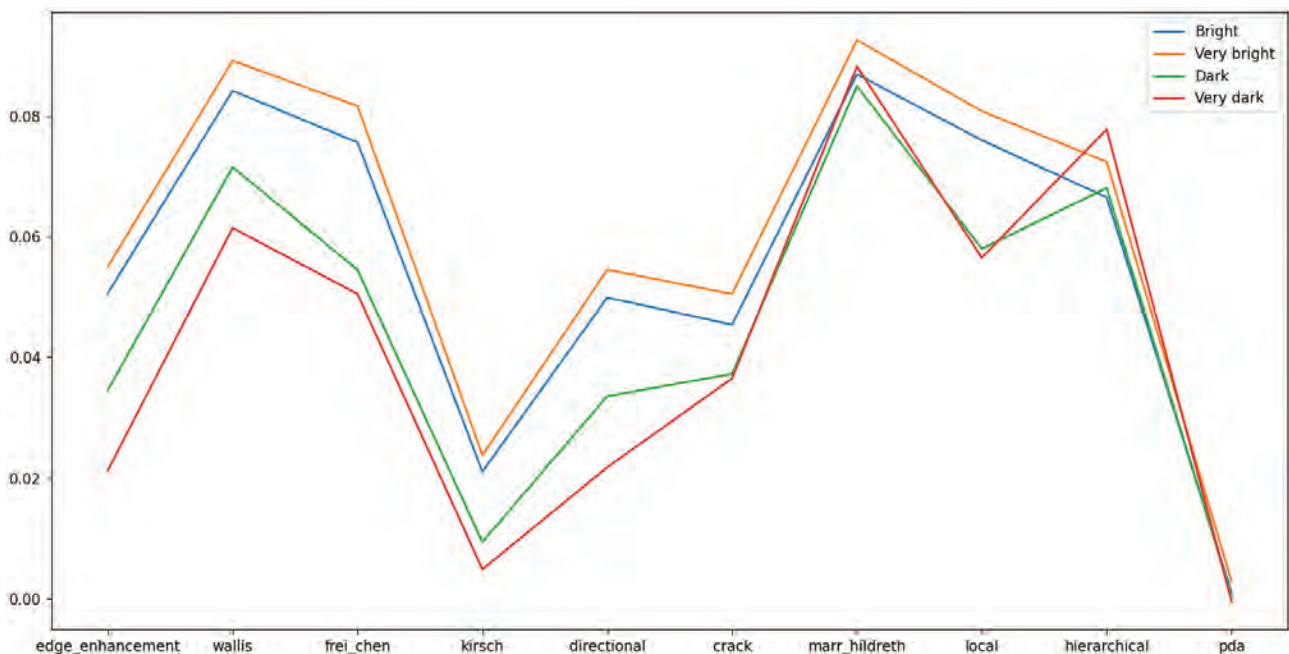


Рис. 6. Графік результатів методів

Отриманий результат є доволі неочікуваним, оскільки передбачали, що для кожного діапазону освітлення буде свій оптимальний метод або один метод на два діапазони. Однак, як виявили тести, у всіх «номінаціях» переміг метод Маара-Хільдеберга. Цей метод не є найновішим, однак в українській літературі він зустрічається значно рідше за інші методи, що досліджувалися за цих самих умов.

### Висновки

Робота виявляє потребу продовжити дослідження й порівняти основні методи, що зустрічаються в українській літературі, оскільки існує висока вірогідність, що деякі з популярних в Україні методів є гіршими за інші в усіх комбінаціях (як і є найкращі в усіх комбінаціях). Тому особливо важливо уникнути використання методів із поганими характеристиками в дуже актуальному сьогодні завданні комп'ютерного зору.

### Список використаної літератури

1. Hrytsyk V., Grondzal A., Bilenyk A. Augmented reality for people with disabilities. *CSIT'2015*. Lviv : LPNU, 2015. P. 188–191.
2. Hrytsyk V., Nazarkevych M. Real-Time Sensing, Reasoning and Adaptation for Computer Vision Systems. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. Vol. 77. P. 573–585.
3. Cutting-edge facial recognition goes mainstream. *Reasearch\*eu results magazine*. December 2017 – January 2018. Vol. 68. P. 39.
4. Hrytsyk V., Medykovskyy M., Nazarkevych M. Estimation of Symmetry in the Recognition System with Adaptive Application of Filters. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. № 5.
5. Competitive Diffusion of Gases in a Zeolite Bed: NMR and Slice Selection Procedure, Modeling, and Parameter Identification / M. Petryk et al. *Journal of Physical Chemistry C*. 2015. Vol. 119. № 47. P. 519–525.
6. Krak I., Barmak O., Manziuk E. Using visual analytics to develop human and machine-centric models: A review of approaches and proposed information technology. *Computitional Intelligence*. 2020. № 26. P. 20–26.
7. Szeliski R. *Computer Vision*. London : Springer, 2011. P. XX.
8. Katsaggelos A.K. *Fundamentals of Digital Image and Video Processing*. Coursera. 2020. URL: <https://www.coursera.org/learn/digital>
9. Pitsun O. OpenCV image segmentation. 2016. URL: <https://github.com/olehpitsun/CVforStudents/tree/master/src/task2>
10. Scikit-learn. *Machine learning in Python*. 2023. URL: <https://scikit-learn.org/stable/>
11. Jeffrey A. Klark (Alex) and contributors. *Pillow (Python Imaging Library) 9.5.0 documentation*. Pillow. 2023. URL: <https://pillow.readthedocs.io/en/stable/>
12. Tensor Flow. *Machine learning models. Convolutional neural network*. URL: <https://www.tensorflow.org/>
13. Forsyth D., J. Ponce. *Computer Vision: A Modern Approach*. 1 August 2002.
14. Method of detecting special points on biometric images based on new filtering methods / M. Nazarkevych et al. *Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems, CPITS 2021*. Kyiv, 2021.
15. Evaluation of the effectiveness of different image skeletonization methods in biometric security systems / M. Nazarkevych et al. *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*. 2021. Vol. 11. № 5. P. 542–552.

### References

1. Hrytsyk, V., Grondzal., A. & Bilenyk, A. (2015). Augmented reality for people with disabilities. *CSIT'2015*. Lviv : LPNU. P. 188–191.

2. Hrytsyk, V. & Nazarkevych, M. (2022). Real-Time Sensing, Reasoning and Adaptation for Computer Vision Systems. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Vol. 77. P. 573–585. doi:10.1007/978-3-030-82014-5\_39
3. Cutting-edge facial recognition goes mainstream. (December 2017 – January 2018). *Research\*eu results magazine*. Vol. 68. P. 39.
4. Hrytsyk, V., Medykovsky, M. & Nazarkevych, M. (2022, May). Estimation of Symmetry in the Recognition System with Adaptive Application of Filters. *Symmetry*. Vol. 14. № 5. Article number 903. doi:10.3390/sym14050903
5. Petryk, M., Leclerc, S. & Canet, D. et al. (2015). Competitive Diffusion of Gases in a Zeolite Bed: NMR and Slice Selection Procedure, Modeling, and Parameter Identification. *Journal of Physical Chemistry C*. Vol. 119. Is. 47. P. 519–525. doi: 10.1021/ACS.JPCC.5B07974
6. Krak, I., Barmak, O. & Manziuk, E. (2020). Using visual analytics to develop human and machine-centric models: A review of approaches and proposed information technology. *Computational Intelligence*. Vol. 26. P. 20–26. doi:https://doi.org/10.1111/coin.12289
7. Szeliski, R. (2011). *Computer Vision*. London : Springer. doi:/10.1007/978-1-84882-935-0
8. Katsaggelos, A.K. (2020). *Fundamentals of Digital Image and Video Processing*. Coursera. URL: <https://www.coursera.org/learn/digital>
9. Pitsun, O. (2016). *OpenCV image segmentation*. URL: <https://github.com/olehpitsun/CVforStudents/tree/master/src/task2>
10. Scikit-learn. *Machine learning in Python*. (2023). URL: <https://scikit-learn.org/stable>
11. Jeffrey A.Klark (Alex) and contributors. (2023, Jun 28). *Pillow (Python Imaging Library) 9.5.0 documentation*. *Pillow*. 2023. URL: <https://pillow.readthedocs.io/en/stable/>
12. Tensor Flow. *Machine learning models. Convolutional neural network*. URL: <https://www.tensorflow.org/>
13. D. Forsyth, J. Ponce. (2002, August 1). *Computer Vision: A Modern Approach*.
14. Nazarkevych, M., Hrytsyk, V., Voznyi, Y. and other. (2021). Method of detecting special points on biometric images based on new filtering methods. *Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems, CPITS 2021*. Kyiv. P. 243–251.
15. Nazarkevych Mariya, Dmytruk Serhii, Hrytsyk Volodymyr and other. (2021). Evaluation of the effectiveness of different image skeletonization methods in biometric security systems. *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*. Vol. 11(5). P. 542–552. doi: 10.2174/2210327910666201210151809

Грицик Володимир Володимирович – д.т.н., професор Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: [volodymyrhrytsyk@gmail.com](mailto:volodymyrhrytsyk@gmail.com), ORCID: 0000-0002-7681-2211.

Задорожній Владислав Ігорович – студент Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: [volodymyrhrytsyk@gmail.com](mailto:volodymyrhrytsyk@gmail.com), ORCID: 0009-0003-3034-6643.

Volodymyr Hrytsyk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv Polytechnic National University, e-mail: [volodymyrhrytsyk@gmail.com](mailto:volodymyrhrytsyk@gmail.com), ORCID: 0000-0002-7681-2211.

Vladyslav Zadorozhnyi – Student at the Lviv Polytechnic National University, e-mail: [volodymyrhrytsyk@gmail.com](mailto:volodymyrhrytsyk@gmail.com), ORCID: 0009-0003-3034-6643.

В.В. ДУМАНСЬКА, О.А. НАЗАРЕНКО  
Одеська державна академія будівництва та архітектури

## РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МАЛОРОЗМІРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПОКРИТТІВ ПІШОХІДНИХ ДОРІЖОК І МАЙДАНЧИКІВ ЗІ ЗМІНЕНОЮ НИЖНЬОЮ ОСНОВОЮ

Одним із найбільш поширених рішень улаштування пішохідних доріжок, майданчиків, прибудинкових територій є застосування покриттів, що складаються з малорозмірних неармованих бетонних плит. Такий вибір пов'язаний з екологічною чистотою, естетичною привабливістю покриттів, можливістю їх легкого розбирання й заміни зруйнованих елементів. Для запобігання деформаціям у дорожньому одязі з малорозмірних плит запропоновано використовувати плити, що виконані за новими конструктивними рішеннями, а саме, на відміну від традиційних плит із плоскою нижньою основою, застосовувати плити зі зміненою геометричною основою. Проведені раніше дослідження вказують на те, що використання запропонованих покриттів зумовить покращення їх якісних характеристик. Але для виготовлення плит за новими конструктивними рішеннями потрібно попередньо розрахувати їх параметри.

У роботі розглянуті два варіанти моделей плит із квадратною формою в плані, але зі зміненою нижньою геометричною основою. У першому варіанті нижня основа складається з трьох ребристих призматичних елементів, у другому – з п'яти чотиригранних пірамідальних елементів, розташованих у шаховому порядку. Для запобігання додатковим витратам на бетон за рахунок зміненої нижньої основи пропонується залишити об'єм таким самим, як і для аналогічної традиційної плити з плоскою основою, з однаковими розмірами й формою в плані, але знизити об'єм верхньої призматичної частини плити на величину об'єму нижньої основи за рахунок зменшення висоти її бічної сторони. Для зручного і швидкого проведення розрахунків параметрів малорозмірних плит із ребристою та рифленою (з пірамідальних елементів) нижньою основою виведено універсальні формули, які пов'язують між собою параметри висот, довжини ребер, кутів при вершині в поздовжньому перетині й кутів нахилу елементів нижньої основи, а також габаритних розмірів плит у плані. Отримані формули перевірено для з'ясування параметрів розглянутих моделей плит при трьох випадках кутів ( $120^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ) при вершинах у поздовжньому перетині. Результати розрахунків параметрів збіглися з тими, що проведені за допомогою традиційних методів обчислення. Розроблені формули можна застосовувати для отримання параметрів двох запропонованих варіантів плит квадратної форми в плані за будь-яких значень сторони квадрата й кутів при вершині в поздовжньому перетині елементів нижньої основи.

Ключові слова: малорозмірні бетонні тротуарні плити, нижня основа, ребристий призматичний елемент, пірамідальний елемент, висота призматичної частини.

V.V. DUMANSKA, O.A. NAZARENKO  
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

## CALCULATION OF PARAMETERS OF SMALL-SIZED PAVEMENT ELEMENTS OF FOOTPATHS AND AREAS WITH A MODIFIED UNDERSIDE SURFACE

One of the most common solutions for the construction of footpaths, areas, adjacent territories is the use of coatings consisting of small-sized unreinforced concrete paving blocks. This choice is associated with environmental cleanliness, aesthetic appeal of coatings, the possibility of their easy disassembly and replacement of destroyed elements. To prevent deformations in pavement made of small-sized paving blocks, it was proposed to use blocks made according to new design solutions, namely, in contrast to traditional paving blocks with a flat underside surface, use paving blocks with a modified geometric base. Previous experiments indicate that the use of the proposed pavements will lead to an improvement in their qualitative characteristics. But for the manufacture of plates according to new design solutions, it is necessary to first calculate their parameters.

The paper considers two variants of square-shaped paving block models in plan, but with a modified lower geometric base. In the first version, the underside surface consists of three ribbed prismatic elements, in the second, of five tetrahedral pyramidal elements arranged in a checkerboard pattern. To prevent additional costs due to the modified underside surface, it is proposed to leave the volume the same as for a similar traditional paving block with a flat base with the same dimensions and shape in plan, but reduce the volume of the upper prismatic part of the paving block by the volume of the underside surface by reducing its height lateral side. For convenient and quick calculations of the parameters of small-sized paving blocks with ribbed and corrugated (from pyramidal elements) underside surface, universal formulas have been derived that relate the parameters of heights, rib lengths, angles at the vertex in the longitudinal section

and inclination angles of the elements of the underside surface, as well as overall dimensions of the paving blocks in plan. The obtained formulas are verified to determine the parameters of the considered plate models for three cases of angles ( $120^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ) at the vertices in the longitudinal section. The results of parameter calculations coincided with those that were carried out using traditional calculation methods. The developed formulas can be used to obtain the parameters of the proposed two variants of square-shaped paving blocks in plan for any values of the side of the square and the angles at the vertex in the longitudinal section of the elements of the underside surface.

*Key words:* small-sized concrete paving blocks, underside surface, ribbed prismatic element, pyramidal element, height of the prismatic part.

### Постановка проблеми

Останніми роками по всьому світу велике значення приділяється якості й надійності дорожнього одягу населених пунктів. Покриття з малорозмірних елементів для будівництва доріжок, майданчиків та інших пішохідних територій мають багато переваг над асфальтобетонними. Але іноді в цих покриттях виникають різного типу руйнування, що потребує проведення пошуків нових конструктивних рішень.

Запропоновано декілька варіантів конструктивних рішень із плит, що мають змінену геометричну основу (рифлену із зубчастих пірамідальних елементів і ребристу з призматичних елементів). Для проведення лабораторних експериментів, натурних досліджень із застосуванням покриттів, виконаних за новими варіантами, і подальшого їх упровадження у виробництво потрібне отримання додаткових габаритних параметрів запропонованих плит. Безпомилковий розрахунок параметру висоти бічної сторони кожної з моделей потребує уваги й витрат певної кількості часу. Тому постало питання знаходження формул для зручного, швидкого й точного обчислення необхідного параметру залежно від моделі плити зі зміненою геометричною нижньою основою.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Покриття доріг є одним із ключових елементів благоустрою міст. На вибір конструктивного рішення покриття впливає багато факторів, наприклад, категорія вулиці (дороги), максимальна величина вертикально прикладеного навантаження, кліматичні умови, характеристики ґрунтів тощо. До пішохідних доріг і майданчиків висуваються вимоги стосовно екологічності, естетичної привабливості, функціональності, міцності й довговічності. Оптимальним варіантом конструктивно-технологічного рішення, що задовольняє цим вимогам, є рішення, за якого верхній шар дорожнього одягу виконаний із малорозмірних плит, до яких належать фігурні елементи мостіння (ФЕМ) [1]. Ці елементи виготовляють із бетону, який є екологічно чистим матеріалом. Елементи можуть бути різноманітних форм, товщин і розмірів у плані, мати різнокольорове забарвлення, а це дає змогу влаштовувати покриття різних орнаментів і форм, що робить населені пункти більш привабливими для мешканців і гостей цих міст.

Під час експлуатації покриттів на них впливають вертикально й горизонтально спрямовані навантаження. За неправильних умов експлуатації пішохідних доріжок і майданчиків відбувається їх руйнування. Однією з причин таких дефектів є неправильно обране конструктивне рішення покриття. Під час візуального обстеження покриттів пішохідних зон із ФЕМ (як у населених пунктах України, так і за кордоном) у деяких випадках спостерігалися деформації, до яких належать зсув, западини, розхитування, тріщини, руйнування окремих елементів або цілих ділянок покриття (рис. 1, 2). Для запобігання зсуву традиційних плит стосовно початкового положення по периметру ділянки покриття потрібно передбачати жорстке затискання, наприклад, за допомогою бортів чи бордюрів. Але ці фіксуючі елементи під дією навантажень можуть розхитуватися, що призводить до руйнування покриттів. Вплив вертикальних навантажень, набагато більших, ніж розрахункові, призводить до осідання елементів покриття, виникнення в них тріщин тощо.



Рис. 1. Деформації ділянки тротуару з малорозмірних плит, Болгарія, Сонячний берег



Рис. 2. Руїнування ділянки тротуару з фігурних елементів мостіння, Польща, м. Косцян

Для підвищення несучої здатності й зменшення горизонтального зсуву та відхилень від проектного положення елементів верхнього шару дорожнього одягу запропоновано під час улаштування покриттів, замість традиційних плит із плоскою основою, використовувати плити зі зміненою геометричною формою нижньої основи [2; 3].

Одним із варіантів покриттів є такі, у яких нижня основа плит складається з ребристих (рис. 3) або пірамідальних (рис. 4) елементів. У разі збільшення площі нижньої основи плита може сприймати та передавати навантаження на збільшений об'єм нижче розташованих шарів дорожнього одягу, тобто зростає несуча здатність покриття [3; 4]. Форма нижньої основи призводить до додаткового ущільнення дрібнозернистих шарів одягу під покриттями, що також сприяє збільшенню несучої здатності. Змінена форма основи буде перешкоджати горизонтальному зсуву плит покриття в разі впливу на них горизонтального навантаження від колісного транспорту [5].



Рис. 3. Експериментальний зразок плити з трьома ребристими призматичними елементами в нижній основі



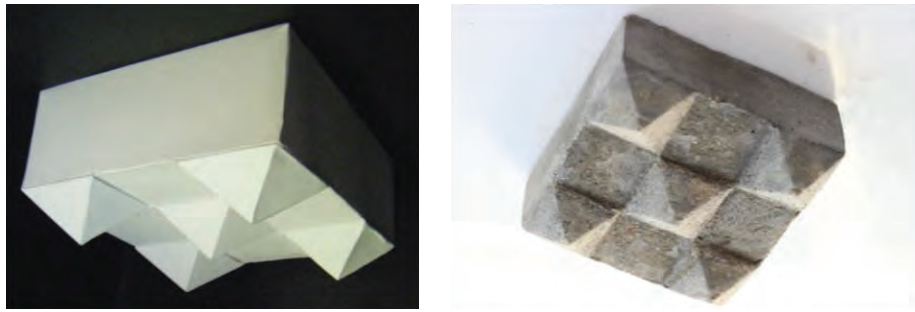


Рис. 4. Зовнішній вигляд моделі плити з п'ятьма зубчастими елементами в нижній основі (макет з паперу й експериментальний зразок із бетону)

Для запобігання додатковим витратам на бетон (за рахунок збільшеного об'єму нижньої основи) об'єм запропонованих елементів покриття повинен бути не більшим, ніж об'єм для виготовлення традиційних плит із плоскою основою з такими самими розмірами й формою в плані. Завдання можна вирішити шляхом зменшення висоти бічної грані елементів мостіння. Але для отримання цього параметра для тої чи іншої запропонованої моделі буде витрачено багато часу для проведення ретельних розрахунків. Тому потрібно знайти більш зручний спосіб для легкого і швидкого обчислення параметра висоти бічної поверхні бетонних плит зі зміненою геометричною формою нижньої основи.

#### Мета дослідження

**Метою дослідження** є отримання універсальних формул для обчислення габаритних параметрів малорозмірних плит із ребристою (із призматичних елементів) і рифленою (з пірамідальних елементів) нижньою основою для покриттів пішохідних територій.

Завдання досягається шляхом пошуку залежності між собою параметрів висот бічної поверхні малорозмірних плит, довжини ребер, кутів при вершині в поздовжньому перетині, кутів нахилу елементів нижньої основи, а також габаритних розмірів плит у плані.

#### Виклад основного матеріалу дослідження

Перед нами постало питання пошуку формули для зручного розрахунку висоти бічної сторони плиток зі зміненою геометричною основою за умови, що об'єм запропонованих плиток має бути таким, як і традиційна плитка з такою самою формою та розмірами в плані. Зрозуміло, щоб задовольняти цій умові, висота бічної сторони запропонованих моделей має буде зменшена.

Розглянемо два варіанти плит покриття, запропонованих раніше: з ребристою нижньою основою з трьома призматичними елементами (рис. 5) і з рифленою нижньою основою з п'ятьма пірамідальними елементами (рис. 6). У плані вони мають форму квадрата. Товщина традиційних фігурних елементів (із плоскою основою), згідно з ДСТУ Б В.2.7–238:2010, може бути прийнятою від 5 до 10 см, що залежить від матеріалу шару основи під покриттями доріг і майданчиків, навантаження на дорожній одяг тощо.

Позначимо габаритні розміри, де  $a$  – сторона квадрата,  $b$  – висота бічної сторони (без урахування зміненої нижньої основи). Виберемо як приклад традиційну плитку зі стороною квадрата в плані 12 см і висотою бічної сторони 5 см. Тоді об'єм бетону, необхідний для виготовлення такої плитки, розрахуємо за такою формулою (1):

$$V = 5 \cdot 12 \cdot 12 = 720 \text{ см}^3; \quad b = 5 \text{ см}; \quad a = 12 \text{ см}. \quad (1)$$

Розглянемо перший варіант – модель плитки з ребристою нижньою основою з трьома призматичними елементами (рис. 5). Розрахуємо її габаритні розміри. При цьому будемо припускати, що  $a = \text{const}$  і  $V$  – витрата бетону =  $\text{const}$ , тоді:

$$b = 5 - \frac{a}{12 \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}. \quad (2)$$

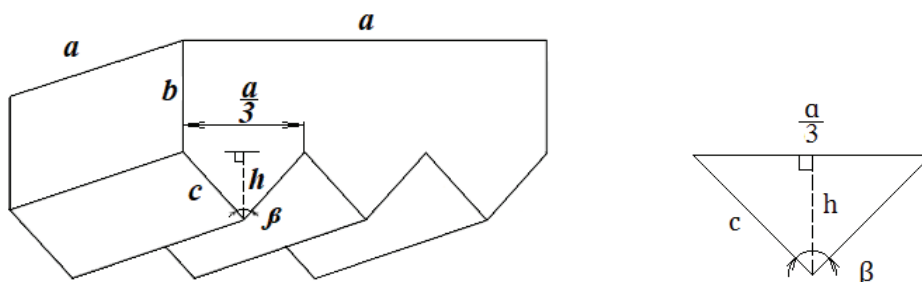


Рис. 5. Розрахункові параметри моделі плити квадратної форми в плані з трьома призматичними ребристими елементами в нижній основі

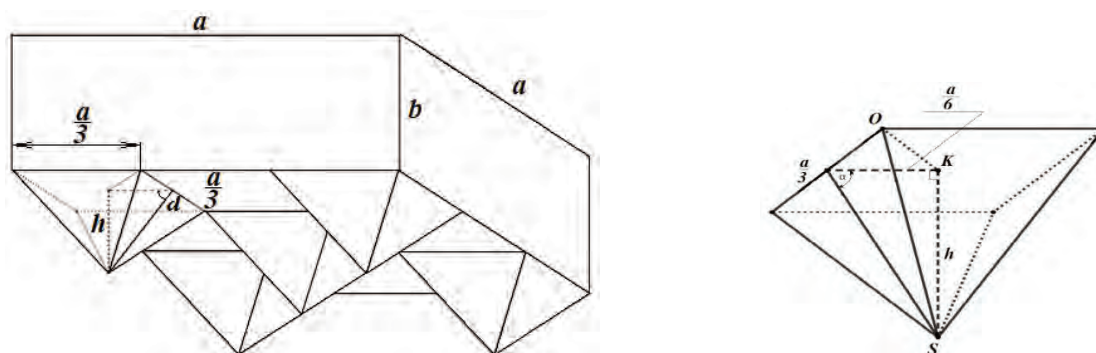


Рис. 6. Розрахункові параметри моделі плити квадратної форми в плані з п'ятьма пірамідальними елементами в нижній основі

Обчислимо такі габаритні розміри моделі плитки з ребристою основою:

$$h = \frac{a}{6 \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)}, \quad (3)$$

$$c = \frac{a}{6 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}. \quad (4)$$

Отримані формули є універсальними для будь-яких кутів  $\beta$ .

Розглянемо три окремі випадки:

1)  $\beta = 120^\circ$

$$h = \frac{12}{6\sqrt{3}} \approx 1,15 \text{ см}; \quad c = \frac{4}{\sqrt{3}} \approx 2,31 \text{ см}; \quad b = 5 - \frac{12}{12\sqrt{3}} \approx 4,42 \text{ см};$$

2)  $\beta = 90^\circ$

$$h = \frac{12}{6} = 2 \text{ см}; \quad c = \frac{4}{\sqrt{2}} \approx 2,83 \text{ см}; \quad b = 5 - \frac{12}{12 \cdot 1} = 4 \text{ см};$$

3)  $\beta = 60^\circ$

$$h = \frac{12 \cdot 3}{6\sqrt{3}} = 3,46 \text{ см}; \quad c = 2 \cdot 2 = 4 \text{ см}; \quad b = 5 - \frac{3}{\sqrt{3}} \approx 3,26 \text{ см}.$$

Розглянемо другий варіант – модель плитки з рифленою нижньою основою з п'ятьма зубчастими елементами пірамідальної форми, розташованими в шаховому порядку (рис. 6). Основа кожної з п'ятьох пірамід має форму квадрата зі стороною  $a/3$  та кутом нахилу бічних граней до основи  $\alpha$ .

Користуючись позначеннями з попереднього розрахунку, отримуємо такі формули:

$$b = 5 \left( 1 - \frac{a \cdot \operatorname{tg} \alpha}{162} \right), \quad (5)$$

$$h = \frac{a \cdot \operatorname{tg} \alpha}{6}. \quad (6)$$

Бічні ребра кожного з пірамідальних елементів дорівнюють:

$$|OS| = \frac{a}{6} \sqrt{2 + \operatorname{tg}^2 \alpha}. \quad (7)$$

Розглянемо окремі випадки розрахунку висоти бічної сторони моделі із зубчастих елементів пірамідальної форми при  $a = 12$  см і куті при вершині піраміди у вертикальному перетині  $\beta$   $120^\circ$ ,  $90^\circ$  і  $60^\circ$ . З'ясуємо висоту піраміди  $h = |SK|$ , розрахуємо довжину бічного ребра піраміди  $|OS|$  та обчислимо висоту бічної сторони  $b$  кожної з моделей плиток:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 30^\circ (\beta = 120^\circ): \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{3} \approx 1,15 \text{ см} \\ \alpha = 45^\circ (\beta = 90^\circ): 2 \text{ см} \\ \alpha = 60^\circ (\beta = 60^\circ): 2 \cdot \sqrt{3} \approx 3,46 \text{ см} \end{array} \right\} h = |SK|;$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 30^\circ (\beta = 120^\circ): 2 \cdot \sqrt{\frac{7}{3}} \approx 3,06 \text{ см} \\ \alpha = 45^\circ (\beta = 90^\circ): 2 \cdot \sqrt{3} \approx 3,46 \text{ см} \\ \alpha = 60^\circ (\beta = 60^\circ): 2 \cdot \sqrt{5} \approx 4,47 \text{ см} \end{array} \right\} |OS|;$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 30^\circ (\beta = 120^\circ): 5 \left( 1 - \frac{12 \cdot \sqrt{3}}{162 \cdot 3} \right) \approx 4,79 \text{ см} \\ \alpha = 45^\circ (\beta = 90^\circ): 5 \left( 1 - \frac{12}{162} \cdot 1 \right) \approx 4,63 \text{ см} \\ \alpha = 60^\circ (\beta = 60^\circ): 5 \left( 1 - \frac{12}{162} \cdot \sqrt{3} \right) \approx 4,36 \text{ см} \end{array} \right\} b.$$

Результати розрахунків параметра висоти бічної сторони плит зі зміненою основою за запропонованими формулами порівняли з тими самими параметрами, але отриманими під час розрахунку за традиційним методом (коли від значення об'єму плитки з пласкою основою віднімаємо знайдений об'єм елементів нижньої основи й отримане число ділимо на площу верхньої основи плитки). З'ясовано, що отримані параметри є однаковими, що дає змогу рекомендувати виведені формули для проведення розрахунків малорозмірних плит квадратної форми у виробництво.

### Висновки

У статті розглянуто два варіанти покриттів пішохідних територій із малорозмірних плит, нижня основа яких складається в першому варіанті з трьох призматичних, а в другому з п'яти пірамідальних елементів. Виведено універсальні формули для зручного обчислення висоти бічної сторони й ребра основи двох варіантів моделей плит. Отримані формули пов'язують між собою параметри висот, довжини ребер, кутів нахилу елементів, що розташовані в нижній основі, і габаритні розміри плит у плані.

### Список використаної літератури

1. Burak R.J., Eng P. Construction details and guide specifications for interlocking concrete pavement. Montreal, Quebec : INFRA, 2002. 16 p.
2. The Effect of Groove-Underside Shaped Concrete Block on Pavement Permanent Deformation / M. Azman et al. *Jurnal Teknologi Sciences & Engineering*. 2013. Vol. 61. Is. 3. P. 7–14.
3. Думанська В.В. Вдосконалення технології улаштування покриттів з фігурних елементів мостіння : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.23.08 «Технологія та організація промислового та цивільного будівництва» / Одеська державна академія будівництва та архітектури. Одеса, 2011. 20 с.
4. Study of pavements of concrete paving blocks with ribbed underside surface / V. Dumanska et al. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864. P. 101–107.
5. Dumanska V., Vilinska L., Marchenko V. Studies of coatings from FEP with corrugated base from toothed elements of pyramidal shape on the horizontal and inclined surfaces. *Academic Journal. Series "Industrial Machine Building, Civil Engineering"*. 2017. № 1(48). P. 265–272.

### References

1. Burak, R.J. & Eng, P. (2002). Construction details and guide specifications for interlocking concrete pavement. Montreal, Quebec: INFRA. [in English]
2. Azman, M., Hasanan, M.N., Mohd, R.H., Haryati, Y., Che, R.I. & Nur Hafizah, A.K. (2013). The Effect of Groove-Underside Shaped Concrete Block on Pavement Permanent Deformation. *Jurnal Teknologi Sciences & Engineerin*. Vol. 61. Is. 3. P. 7–14. [in English]
3. Dumanska, V.V. (2011). Vdoskonalennia tekhnolohii ulashtuvannia pokryttiv z fihurnykh elementiv mostinnia – [Improvement of the technology unit of coatings of figured paving elements] : Extended abstract of candidate's thesis / Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Odesa. [in Ukrainian]
4. Dumanska, V., Kalinin, O., Sidorova, N. & Kalinina, T. (2020). Study of pavements of concrete paving blocks with ribbed underside surface. *Key Engineering Materials*. Vol. 864. P. 101–107. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.864.101 [in English]
5. Dumanska, V., Vilinska, L. & Marchenko, V. (2017). Studies of coatings from FEP with corrugated base from toothed elements of pyramidal shape on the horizontal and inclined surfaces. *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Vol. 1(48). P. 265–272. [in English]

Думанська Вероніка Валентинівна – к.т.н., доцент кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки Одеської державної академії будівництва та архітектури, e-mail: dumanika@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0135-9501.

Назаренко Олег Аскольдович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, e-mail: gelo.fabric@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0405-6522.

Dumanska Veronika Valentiniivna – Ph.D. (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor at the Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics of the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, e-mail: dumanika@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0135-9501.

Nazarenko Oleg Askoldovych – Ph.D. (Candidate of Physical and Mathematical Sciences), Assistant Professor, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics of the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, e-mail: gelo.fabric@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0405-6522.

О.А. ЖУРАН, Л.С. ФОНАР, О.С. КОНОВАЛОВ, В.О. ПАНІН  
Національний університет «Одеська політехніка»

## АНАЛІЗ РИЗИКІВ ІТ-ПРОЄКТУ ВЕБРЕСУРСУ ДЛЯ КОМУНІКАЦІЇ ОСВІТНІХ ЗАКЛАДІВ

Метою дослідження є аналіз ризиків, пов'язаних із реалізацією ІТ-проєкту адміністрування вебресурсів, призначеного для покращення комунікації між освітнім закладом і стейкхолдерами. Використання он-лайн соціальних мереж може спростити розповсюдження новин кафедри, здобутків здобувачів і викладачів, цікавих подій, пропозицій навчання, стажування, участі в конкурсах тощо. Створення сторінок у соціальних мережах дасть змогу структурному підрозділу допомогти випускникам залишатися в контакті, знаходити можливості співпраці, обмінюватися досвідом, а також організувати зустрічі, заходи та спільні проєкти в реальному житті. Основні причини невдач ІТ-проєктів можуть включати таке: погане управління, недостатнє залучення зацікавлених сторін, недостатній аналіз вимог, зміни вимог під час розробки, недостатню комунікацію тощо. Усі ці фактори є ризиками щодо успішності реалізації проєкту й відповідності запланованим показникам за вартістю, часом, термінами або якістю. Крім того, під час управління проєктними ризиками варто враховувати той фактор, що більшість ІТ-проєктів унікальні, а іноді взагалі не мають аналогів. Саме тому й ризики для кожного з таких проєктів мають особливість. Важливо розглядати ризики ІТ-проєкту вебресурсу для комунікації освітніх закладів, ураховуючи організаційні особливості й структурних підрозділів навчального закладу і властивості соцмереж та інтернет-спілкування, а також проблеми, які виникають у процесі використання сторонніх веб-ресурсів, на які виконавці не можуть впливати. У статті проведено комплексний огляд потенційних ризикових ситуацій, що можуть виникнути. Визначено 4 ризики внутрішнього й 4 ризики зовнішнього середовища проєкту. Для кожного ідентифікованого ризику з'ясовано причину його виникнення – фактор ризику. Найчастіше факторами ризику обраного проєкту є людські ресурси й форс-мажор. Підсумковий аналіз ризиків дає змогу розробникам, управлінцям і зацікавленим сторонам краще зрозуміти важливість аспектів безпеки та планування для успішної реалізації запропонованого ІТ-проєкту з мінімізацією можливих негативних наслідків.

Ключові слова: ІТ-проєкт, заклад вищої освіти, управління проєктами, SWOT аналіз, ризики, соцмережі.

O.A. ZHURAN, L.S. FONAR, O.S. KONOVALOV, V.O. PANIN  
Odesa Polytechnic National University

## RISK ANALYSIS OF AN IT PROJECT FOR A WEB RESOURCE AIMED AT COMMUNICATION IN EDUCATIONAL INSTITUTIONS

The aim of the conducted research is to analyze the risks associated with the implementation of an IT project for the administration of web resources aimed at improving communication between educational institutions and stakeholders. The use of online social networks can facilitate the dissemination of departmental news, achievements of students and teachers, interesting events, educational offers, internships, participation in competitions, and more. Creating pages on social networks will allow the department to help graduates stay in touch, find collaboration opportunities, exchange information, and also organize meetings, events, and joint real-life projects. The main causes of IT project failures can include poor management, insufficient engagement of stakeholders, inadequate requirement analysis, changing requirements during development, insufficient communication, and more. All these factors pose risks to the success of project implementation and adherence to planned metrics in terms of cost, time, deadlines, or quality. Additionally, in managing project risks, it is important to consider that most IT projects are unique and sometimes have no analogs. Therefore, risks for each such project have their own specificity. It is crucial to examine the risks of an IT project for a web resource in communication with educational institutions, taking into account the organizational characteristics and structural departments of the educational institution, properties of social networks and online communication, as well as the problems arising from the use of third-party web resources that project executors cannot influence. Within the article, a comprehensive overview of potential risk situations that may arise is conducted. Four internal and four external environmental risks of the project are identified. For each identified risk, the cause of its occurrence – the risk factor is determined. The most common risk factors for the chosen project are human resources and force majeure. The cumulative risk analysis enables developers, managers, and stakeholders to better understand the importance of security aspects and planning for the successful implementation of the proposed IT project while minimizing potential negative consequences.

Key words: IT project, higher education institution, project management, SWOT analysis, risks, social networks.

### Постановка проблеми

Популярність соціальних мереж серед молоді, здобувачів та абітурієнтів постійно зростає. Вимушені умови дистанційного навчання, обмеженої соціалізації, пандемія, війна – усе це останніми роками значно підвищило важливість он-лайн соціальних мереж для спілкування, пошуку інформації та відгуків. Неможливість навчатися в аудиторному форматі для здобувачів, відвідувати дні відкритих дверей для абітурієнтів, евакуація та руйнування закладів освіти через війну – усе це негативно впливає на якість спілкування, самореалізації, соціального розвитку молоді.

Науково-викладацький склад також відчуває на собі наслідки он-лайн освіти, проблеми організаційного та виховного характеру під час роботи зі студентами через неможливість спілкуватися наживо.

Використання он-лайн соціальних мереж може допомогти вирішити деякі з перелічених проблем, покращити якість спілкування, спростити доведення новин кафедри, здобутків здобувачів і викладачів, цікавих подій, пропозицій навчання, стажування, участі в конкурсах тощо.

Також активна участь освітніх закладів у соцмережах збільшує охоплення потенційних абітурієнтів і їхніх батьків, підвищує обізнаність суспільства й наукової спільноти про здобутки кафедр, інститутів та університету загалом. Створення сторінок у соціальних мережах дасть змогу кафедрі залучити більше уваги і створити свій унікальний імідж серед студентів, співробітників і гостей. Здобувачі, які вже закінчили навчання, можуть залишатися в контакті через соціальні мережі, знаходити можливості співпраці, обмінюватися досвідом і підтримувати зв'язок зі своєю навчальною установою, а також організовувати зустрічі, заходи та спільні проекти в реальному житті.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Використання соціальних мереж та інших веб-ресурсів для комунікації освітніх закладів зі здобувачами – їх створення, адміністрування та просування – можна розглядати як ІТ-проект. У свою чергу, будь-який проект, безумовно, має ризики щодо його реалізації.

У вітчизняній науковій літературі розглянуто концептуальні положення управління ризиками ІТ-проектів з урахування особливостей впливу українського зовнішнього середовища [1].

Загальна характеристика методів і механізмів реагування на ризики ІТ-проектів висвітлені авторами в попередніх дослідженнях [2].

Зростання використання цифрових технологій майже в усіх сферах життя призвели до того, що велика частина особистих, корпоративних, фінансових і конфіденційних даних тепер зберігається та обробляється онлайн. У свою чергу, зростають злочини та зловживання особистою інформацією. Запобігання кіберзлочинності й безпека під час використання веб-технологій дистанційного навчання є першочерговими завданнями в управлінні проектними ризиками у сфері ІТ [3].

У роботах І.В. Рішняк розглядає ризики проекту як багатоаспектну систему та пропонує використовувати для аналізу методи імітаційного моделювання [4–5].

За даними деяких досліджень, близько 50% усіх ІТ-проектів вважаються невдалими, тобто вони завершуються або затримуються з порушенням термінів, бюджету або специфікацій. Близько 70% проектів зазнають затримок у термінах або вартості [1]. На жаль, зараз відсутня українська статистика щодо успішності реалізації ІТ-проектів і причин їх невдач. Також сучасна нестабільність зовнішнього середовища сильно впливає на хід реалізації проектів і також знижує їх результативність.

Використання веб-технологій в освітньому середовищі має свої переваги й недоліки [6; 7]. Основні причини невдач ІТ-проектів можуть включати погане управління, недостатнє залучення зацікавлених сторін, неповний аналіз вимог, зміни вимог під час розробки, недостатню комунікацію тощо. Усі ці фактори є ризиками щодо успішності реалізації проекту й відповідності запланованим показникам за вартістю, часом, термінами або якістю. Крім того, під

час управління проєктними ризиками варто враховувати той фактор, що більшість ІТ-проєктів унікальні, а іноді взагалі не мають аналогів. Саме тому й ризики для кожного з таких проєктів мають свою особливість.

### Мета дослідження

Метою проведеного дослідження є виконання детального аналізу ризиків, пов'язаних із реалізацією веб-ресурсу, призначеного для покращення комунікації між освітнім закладом і стейкхолдерами (здобувачами, абітурієнтами, випускниками, співробітниками, роботодавцями та ін.). У статті проведено комплексний огляд потенційних ризикових ситуацій, що можуть виникнути під час розробки й експлуатації цього веб-ресурсу. Підсумковий аналіз ризиків дає змогу розробникам, управлінцям і зацікавленим сторонам краще зрозуміти важливість аспектів безпеки та планування для успішної реалізації запропонованого ІТ-проєкту з мінімізацією можливих негативних наслідків.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Останніми роками здобувачі досить часто самостійно створюють групи спілкування для однокласників, однокурсників або загальні групи для здобувачів чи абітурієнтів того чи іншого навчального закладу. Найчастіше для цього використовують он-лайн соціальні мережі або месенджери: Телеграм-канали, Discord, Instagram, Facebook, Instagram, Twitter тощо. Бажання спілкуватися, ділитися новинами, враженнями й іншою інформацією – важливе питання для розвитку будь-якої особистості. Але часто такі групи мають суто неформальний характер і не несуть інформаційної цінності з погляду донесення до співробітників ВНЗ, здобувачів або абітурієнтів офіційної інформації чи поточних новин окремої кафедри.

Мета ІТ проєкту полягає в створенні й адмініструванні сторінок кафедри штучного інтелекту й аналізу даних Інституту штучного інтелекту та робототехніки Національного університету «Одеська політехніка» в трьох соціальних мережах. Для кожної онлайн мережі (Facebook, Twitter, Instagram) призначено окремого адміністратора, а також керівника групи.

Ухвалення проєктних рішень зазвичай відбувається в умовах ризику та невизначеності. Основними причинами їх наявності є:

- відсутність повної інформації про продукт проєкту, проєктне середовище, неможливість точного оцінювання необхідних для роботи параметрів проєкту;
- неможливість абсолютного прогнозування всіх чинників, що можуть вплинути на проєкт;
- наявність суб'єктивних чинників, пов'язаних з інтересами стейкхолдерів.

Багатоаспектність ризику як складного явища зумовлює існування кількох визначень понять ризику з різних поглядів. Наведемо визначення ризику за класикою проєктного управління з PMBOOK.

Ризик проєкту – це невизначена подія або умова, настання якої негативно чи позитивно позначається на цілях проєкту, змісті, розкладу, вартості та якості [8].

Найбільша увага в проєктному ризик-менеджменті приділяється саме негативним ризикам. Уже на етапі планування керівникові проєкту треба ідентифікувати, проаналізувати ризики й обрати метод реагування на них з метою нівелювання негативного впливу ризику на проєкт.

Для ідентифікування ризиків у контексті аналізу проєктів, у тому числі й у розробці веб-ресурсу для комунікації освітніх закладів, може бути використаний SWOT-аналіз [9].

SWOT-аналіз дає змогу розглянути внутрішні й зовнішні аспекти проєкту, оцінити його сильні та слабкі сторони, а також визначити можливості й загрози. Усі ці ризики важливо аналізувати та включити до плану управління ризиками для забезпечення успішної реалізації проєкту. Наприклад, для внутрішніх ризиків можуть бути розроблені плани резервного планування в разі втрати ключових осіб або відрахування студентів. Для зовнішніх ризиків можуть бути розглянуті плани резервного копіювання серверів і резервних шляхів доступу. З урахуванням виявлених сильних

сторін, слабких сторін, можливостей і загроз можна розробити конкретні стратегії для управління ризиками. Наприклад, розглянути можливість підготовки команди до можливих викликів.

Визначені ризики внутрішнього й зовнішнього середовища ІТ-проєкту для проєкту, що розглядається, подано в табл. 1.

Таблиця 1

**Ризики внутрішнього та зовнішнього середовища ІТ-проєкту**

Середовище проєкту	Ризики
Внутрішнє	Звільнення викладача Відрахування студента Ліквідація кафедри або інституту Особиста дисципліна виконавців
Зовнішнє	Відсутність інтернет-доступу Відсутність доступу до сервісу через «падіння» його серверу Відсутність доступу до сервісу через його власні блокування Блокування доступу до сервісу через унесення його до «чорного списку» сайтів

Для кожного ідентифікованого ризику визначено причину його виникнення – фактор ризику, проведено класифікацію ризиків за ознаками: час дії та керованість (табл. 2).

Таблиця 2

**Класифікація ризиків**

Ризик	Фактор ризику	Час дії	Керованість
Звільнення викладача	Людські ресурси підприємства	Після запуску проєкту	Керований
Відрахування студента	Людські ресурси підприємства	Після запуску проєкту	Керований
Ліквідація кафедри або інституту	Діяльність ВНЗ	Весь час існування проєкту	Керований
Особиста дисципліна виконавців	Особистий фактор	Весь час існування проєкту	Керований
Відсутність інтернет-доступу у виконавців	Форс-мажорні обставини	Весь час існування проєкту	Не керований
Відсутність доступу до сервісу через «падіння» його серверу	Форс-мажорні обставини	Весь час існування проєкту	Не керований
Відсутність доступу до сервісу через його власні блокування	Діяльність підприємства-власника сервісу	Весь час існування проєкту	Не керований
Блокування доступу до сервісу через унесення його до «чорного списку» сайтів	Загальнодержавна політика й законодавство	Весь час існування проєкту	Не керований

Основними інструментами якісного аналізу ризиків є матриця ймовірності й впливу (рейтинги ризиків на підставі комбінації та оцінювання їх ймовірності та ступеня впливу) [10].

Визначимо ранг кожного ідентифікованого ризику залежно від двох показників: ймовірність настання ризику та його впливу на проєкт. Після визначення ймовірності та впливу для кожного ризику вони комбінуються. Це допомагає визначити загальний ризикований ранг для кожного ризику.

Результати цього визначення рангів ризиків можуть бути використані для подальшого планування й розробки стратегій управління ризиками. Також це допомагає визначити, на які ризики потрібно звернути особливу увагу, якщо вони мають високий рівень впливу та ймовірності. Ступінь ризику визначені як добуток ймовірності появи ризику й величини втрат. Отримані результати представлено в табл. 3.



Таблиця 3

**Ранжування ризиків проєкту**

Ризик	Імовірність появи ризику	Величина втрат	Ступінь впливу ризику	Рівень загрози ризику
Звільнення викладача	Імовірна 3	Середня 3	Помірний 9	Виправданий 9
Відрахування студента	Малоймовірна 2	Мінімальна 1	Ігнорований 2	Прийнятний 2
Ліквідація кафедри або інституту	Слабоймовірна 1	Максимальна 5	Незначний 5	Виправданий 9
Особиста дисципліна виконавців	Імовірна 3	Середня 3	Помірний 9	Виправданий 9
Відсутність інтернет-доступу у виконавців	Імовірна 3	Мінімальна 1	Ігнорований 3	Прийнятний 2
Відсутність доступу до сервісу через «падіння» його серверу	Малоймовірна 2	Низька 2	Ігнорований 4	Прийнятний 2
Відсутність доступу до сервісу через його власні блокування	Слабоймовірна 1	Висока 4	Ігнорований 4	Прийнятний 2
Блокування доступу до сервісу через унесення його до «чорного списку» сайтів	Слабоймовірна 1	Висока 4	Ігнорований 4	Прийнятний 2

Вплив ризику на результативність ІТ проєкту зумовлюється зміною значень складників трикутника управління проєктами (час (time), вартість (cost), зміст (score) проєкту). Значення зміни параметрів, що відбуваються як результат впливу ризику, визначають експертним шляхом. Для адміністрування трьох соціальних мереж, якщо розглядаємо вплив ризиків на параметри проєкту (час, вартість, зміст), можна обґрунтувати силу впливу так (табл. 4).

Таблиця 4

**Обґрунтування сили впливу**

Параметр	Час	Вартість	Зміст
Звільнення викладача	6 Сильний вплив, оскільки втрата викладача може призвести до необхідності перерозподілу обов'язків і часу інших членів команди	2 Слабкий вплив, можливість замінити відповідальну особу	3 Слабкий вплив, можливі зміни в змісті мало залежать від виконавця
Відрахування студента	3 Слабкий вплив, можливий невеликий перерозподіл часу для роботи над проєктом	2 Слабкий вплив, можливі незначні додаткові витрати на взаємодію з іншими студентами	1 Відсутній вплив, відрахування студента не має суттєво впливати на зміст проєкту
Ліквідація кафедри або інституту	9 Сильний вплив, можуть знадобитися значні зусилля для адаптації проєкту до змін у структурі університету	8 Сильний вплив, можливі великі додаткові витрати на адаптацію та зміни в проєкті	7 Середній вплив, можливі зміни в програмі та змісті проєкту під нові умови
Особиста дисципліна виконавців	4 Середній вплив, можливі невеликі відхилення в графіку роботи над проєктом	2 Слабкий вплив, можливі незначні додаткові витрати на контроль	3 Слабкий вплив, дисципліна виконавців не повинна впливати на зміст проєкту
Відсутність інтернет-доступу у виконавців	7 Сильний вплив, можлива втрата робочого часу й переривання в роботі над проєктом	5 Середній вплив, можливі додаткові витрати на забезпечення інтернет-доступу	7 Сильний вплив, доступ до ресурсів для проєкту може бути обмеженим

Закінчення таблиці 4

Параметр	Час	Вартість	Зміст
Відсутність доступу до сервісу через «падіння» його серверу	7 Сильний вплив, можливе переривання роботи над проектом через недоступність сервісу	6 Середній вплив, можливі додаткові витрати на відновлення роботи сервера	5 Середній вплив, зміни в змісті можуть бути обмежені
Відсутність доступу до сервісу через його власні блокування	5 Середній вплив, можливі незначні перерви в роботі над проектом	4 Середній вплив, можливі додаткові витрати на відновлення доступу	4 Середній вплив, можуть виникнути зміни в змісті через обмеження доступу
Блокування доступу до сервісу через унесення його до «чорного списку» сайтів	7 Сильний вплив, можливі перерви в роботі над проектом через обмеження доступу	7 Сильний вплив, можливі додаткові витрати на забезпечення доступу до інших ресурсів	5 Середній вплив, можливі зміни в змісті через обмеження доступу й використання інших сервісів з іншими вимогами до змісту

Використовуючи дані таблиці 3, побудуємо діаграми ризиків для кожного з параметрів трикутника ІТ-проекту, на яких відобразимо ступені впливу ситуацій ризику на відповідні параметри (рис. 1).

Сформована так інформаційна панель наочно демонструє силу впливу визначених факторів ризику проекту.

Грунтуючись на ймовірності настання того чи іншого фактору ризику, можемо робити висновок щодо ризикованості проекту загалом і доцільності його впровадження.

У наведеному проекті найбільш впливові ризику слабкоймовірні, тому можна обрати тактику реагування на них – прийняття ризику.

### Висновки

У роботі обрано варіант ідентифікування ризиків проекту, який полягає в створенні й адмініструванні сторінок кафедри штучного інтелекту й аналізу даних Інституту штучного інтелекту та робототехніки Національного університету «Одеська політехніка» в трьох соціальних мережах (Facebook, Twitter, Instagram), застосовуючи метод SWOT-аналізу.

Визначено чотири ризику внутрішнього й чотири ризику зовнішнього середовища проекту. Для кожного ідентифікованого ризику визначено причину його виникнення – фактор ризику. Найчастіше факторами ризику обраного проекту є людські ресурси та форс-мажор.

Проведено класифікацію ризиків за ознаками: час дії, керованість. Усі ризику мають вплив протягом усього існування проекту. Внутрішні ризику обраного проекту, на відміну від зовнішніх, керовані.

На основі отриманих даних найбільш впливові на успішність проекту за всіма трьома параметрами час, вартість, зміст – ситуація ризику: ліквідація кафедри або інституту, відсутність інтернет-доступу у виконавців і блокування доступу до сервісу через унесення його до «чорного списку» сайтів.

Найменше впливають на успішність проекту за параметрами часу, вартості та змісту параметри особиста дисципліна виконавців і відрахування студента.

Практична цінність дослідження полягає в можливості подальшого використання розроблених шаблонів та інформаційних панелей для аналізу ризиків аналогічних проектів.

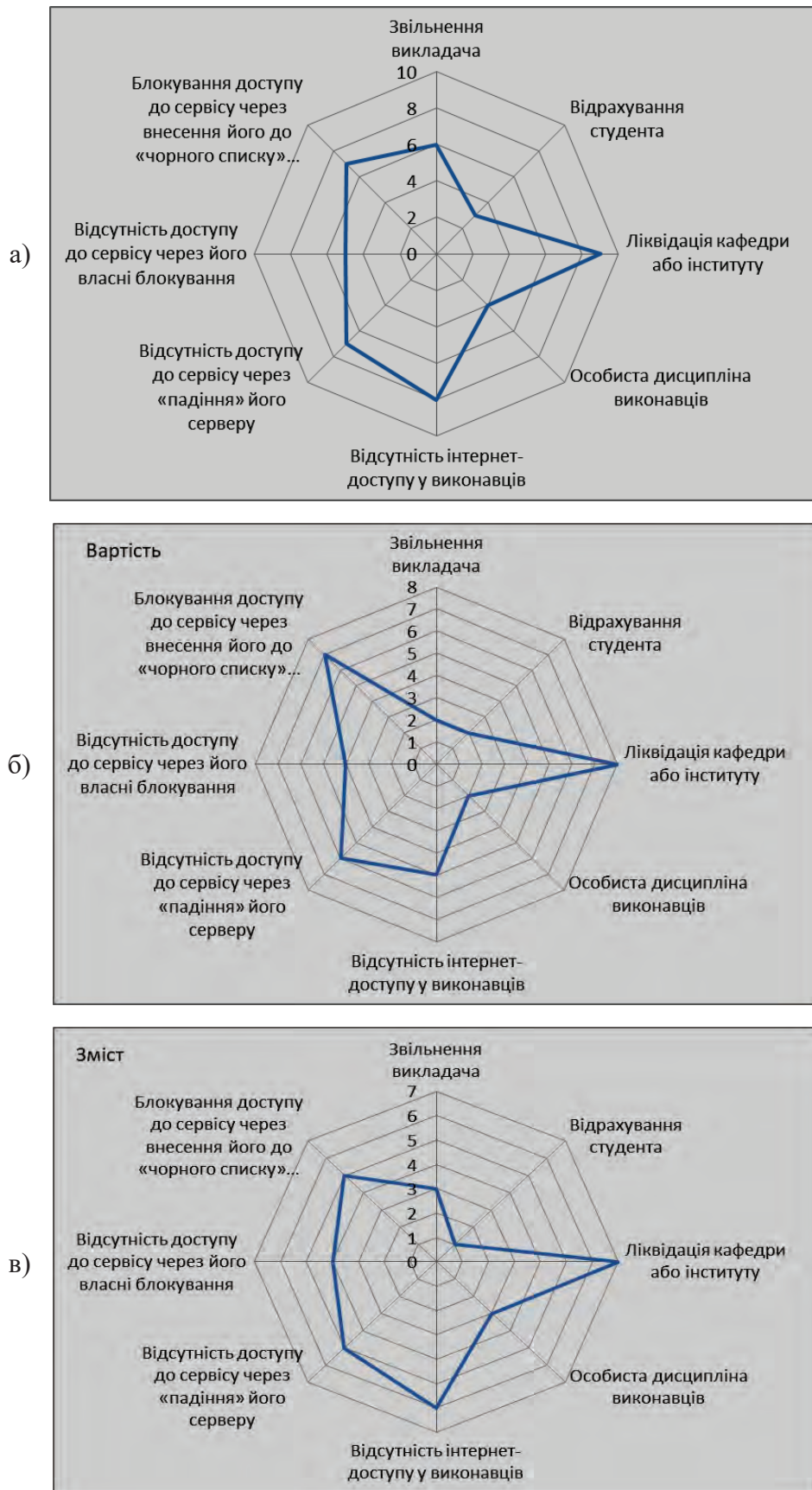


Рис. 1. Вплив ситуацій ризику на час (а), вартість (б), зміст (в)

### Список використаної літератури

1. Лазарева С.Ф, Ткаченко М.А. Управління ризиками ІТ-проектів в Україні в сучасних умовах. *Формування ринкових відносин в Україні*. 2015. № 6(169). С. 169–174.
2. Журан О.А., Глава М.Г. Управління ризиками в ІТ-проектах. *Project, Program, Portfolio Management. P3M*. 2016. Vol. 1. С. 46–48.
3. Фонар Л.С., Коновалов О.С., Філіппов Є.Г. Дослідження загроз інформаційної безпеки при використанні веб-технологій дистанційного навчання. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2022. Т. 5. № 1. С. 101–107.
4. Рішняк І.В. Система управління ризиками ІТ-проектів. *Інформаційні системи та мережі : збірн. наук. праць*. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2011. С. 250–259.
5. Рішняк І.В. Застосування імітаційних моделей для управління ризиками ІТ-проектів. *Інформаційні системи та мережі : збірн. наук. праць*. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. С. 171–181.
6. Назар М.М. Специфіка психологічного впливу навчання користувачів мережі Інтернет. *Освіта дорослих в Україні : матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф.* (Київ, 11–17 вер. 2008 р.). Київ : ЕКМО, 2008. С. 102–104.
7. Середа Х.В. Основні принципи побудови інформаційних систем освіти на основі веб-технологій. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку : матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції / Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького*. Черкаси, 2013. С. 203–205.
8. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 7<sup>th</sup> Edition. Project Management Institute, 2021. 250 p.
9. Шляхта О.М. SWOT-аналіз як інструмент стратегічного менеджменту підприємства. *Економічний простір / Придніпровська державна академія будівництва та архітектури*. 2012. № 68. С. 301–309. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpros\\_2012\\_68\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpros_2012_68_35) (дата звернення: 20.08.2023).
10. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 (ІЕС/ISO 31010:2009 IDT). Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику.

### References

1. Lazareva, S.F. & Tkachenko, M.A. (2015). Upravlinnia ryzykamy IT-proektiv v Ukraini v suchasnykh umovakh – [IT Project risk management in Ukraine under modern conditions]. *Formuvannia rynkovykh vidnosyn v Ukraini*. Vol. 6(169). P. 169–174. [in Ukrainian]
2. Zhuran, O. A. & Hlava, M.H. (2016). Upravlinnia ryzykamy v IT-proektakh – [Risk Management in IT Projects]. *Project, Program, Portfolio Management. P3M*. Vol. 1. P. 46–48. [in Ukrainian]
3. Fonar, L.S., Konovalov, O.S. & Filippov Ye.H. (2022). Doslidzhennia zahroz informatsiinoi bezpeky pry vykorystanni veb-tekhnohii dystantsiinoho navchannia – [Research on information security threats in the use of web technologies for remote learning]. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання*. Vol. 5. Is. 1. P. 101–107. [in Ukrainian]
4. Rishniak, I.V. (2011). Systema upravlinnia ryzykamy IT-proektiv – [IT Project risk management system]. *Informatsiini systemy ta merezhi : zbir. nauk. prats*. Lviv : Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnikha”. P. 250–259. [in Ukrainian]
5. Rishniak, I.V. (2010). Zastosuvannia imitatsiinykh modelei dlia upravlinnia ryzykamy IT-proektiv – [Application of Simulation Models for IT Project Risk Management]. *Informatsiini systemy ta merezhi : zbir. nauk. prats*. Lviv : Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnikha”. P. 171–181. [in Ukrainian]

6. Nazar, M.M. (2008). Spetsyfika psykholohichnoho vplyvu navchannia korystuvachiv merezhi Internet – [Specificity of psychological influence of training of Internet users]. *Osvita doroslykh v Ukraini* : IX Mizhnar. nauk.-prakt. konf., (Kyiv, 11–17 ver. 2008 r.). Kyiv : EKMO. P. 102–104. [in Ukrainian]
7. Sereda, Kh.V. (2013). Osnovni pryntsypy pobudovy informatsiinykh system osvity na osnovi veb-tekhnologii. *Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnologii u vyrobnytstvi ta osviti: stan, dosiahnennia, perspektyvy rozvytku* : Vseukrainska naukovo-praktychna Internet-konferentsiia / Cherkaskyi natsionalnyi universytet imeni Bohdana Khmelnytskoho. Cherkasy. P. 203–205. [in Ukrainian]
8. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). 7<sup>th</sup> Edition. Project Management Institute. 250 p. [in English]
9. Shliakhta, O.M. (2012). SWOT-analiz yak instrument stratehichnoho menedzhmentu pidpriemstva. [SWOT analysis as a tool of strategic enterprise managemen]. *Ekonomichnyi prostir. Prydniprovska derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury*. Vol. 68. P. 301–309. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpros\\_2012\\_68\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecpros_2012_68_35) (accessed 20.08.2023).
10. DSTU IES/ISO 31010:2013 (IES/ISO 31010:2009,IDT). Keruvannia ryzykom. Metody zahalnoho otsiniuvannia ryzyku.

Журан Олена Анатоліївна – к.е.н., доцент кафедри штучного інтелекту та аналізу даних Національного університету «Одеська політехніка», e-mail: [juran@ukr.net](mailto:juran@ukr.net), ORCID: 0000-0001-8487-9072.

Фонар Людмила Сергіївна – к.т.н., доцент кафедри штучного інтелекту та аналізу даних Національного університету «Одеська політехніка», e-mail: [fonar\\_1\\_s@ukr.net](mailto:fonar_1_s@ukr.net), ORCID: 0000-0002-7478-6742.

Коновалов Олександр Сергійович – аспірант кафедри штучного інтелекту та аналізу даних Національного університету «Одеська політехніка», e-mail: [akonovalov.lux@gmail.com](mailto:akonovalov.lux@gmail.com), ORCID: 0000-0001-8023-9633.

Панін Віктор Олександрович – аспірант кафедри штучного інтелекту та аналізу даних Національного університету «Одеська політехніка», e-mail: [panin.8142017@stud.op.edu.ua](mailto:panin.8142017@stud.op.edu.ua).

Zhuran Olena Anatoliivna – PhD in Economics, Associate Professor at the Department of Artificial Intelligence and Data Analysis of the Odesa Polytechnic National University, e-mail: [juran@ukr.net](mailto:juran@ukr.net), ORCID: 0000-0001-8487-9072.

Fonar Liudmyla – PhD in Technology, Associate Professor at the Department of Artificial Intelligence and Data Analysis of the Odesa Polytechnic National University, e-mail: [fonar\\_1\\_s@ukr.net](mailto:fonar_1_s@ukr.net), ORCID: 0000-0002-7478-6742.

Konovalov Oleksandr Serhiiiovych – Graduate Student at the Department of Artificial Intelligence and Data Analysis of the Odesa Polytechnic National University, e-mail: [akonovalov.lux@gmail.com](mailto:akonovalov.lux@gmail.com), ORCID: 0000-0001-8023-9633.

Panin Victor Oleksandrovych – Graduate Student at the Department of Artificial Intelligence and Data Analysis of the Odesa Polytechnic National University, e-mail: [panin.8142017@stud.op.edu.ua](mailto:panin.8142017@stud.op.edu.ua).

Л.К. ЖУЧЕНКО

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## СИСТЕМА ПРОГРАМНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

*Процес випалювання є одним із основних технологічних процесів у виробництві вуглецевих виробів. Оскільки цей процес характеризується значними енерговитратами, виникає актуальне науково-технічне завдання підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів, яка полягає в зменшенні енергоспоживання.*

*Аналіз наявних систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів дав змогу виявити недоліки останніх і сформулювати завдання дослідження, спрямоване на розроблення нової системи програмного керування цим процесом з метою підвищення його ресурсо- і енергозбереження.*

*У статті запропонована система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка, на відміну від наявних систем, де температурний графік процесу задається «вручну» на основі досвіду оператора-технолога, дає змогу розраховувати й реалізовувати оптимальний температурний графік згідно з вибраним критерієм оптимальності.*

*Метою дослідження системи керування було проаналізувати динаміку зміни температур у характерних точках заготовок, що випалюються, а також вплив тривалості процесу випалювання й налаштувань ЛК-регулятора на перепад температур у заготовці, де цей перепад максимальний.*

*Проведено дослідження впливу параметрів налаштування ЛК-регулятора системи програмного керування на динаміку температур у характерних точках заготовок і на витрати палива в процесі випалювання. Представлена система програмного керування передбачає розрахунок керування до початку технологічного процесу випалювання й реалізацію розрахованої програми без зворотного зв'язку. Тим самим відсутня можливість урахування збурень різної природи, які впливають на технологічний процес. У зв'язку з цим показана доцільність побудови системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів реального часу.*

*Ключові слова: вуглецеві вироби, програмне керування, система керування, ЛК-регулятор.*

L.K. ZHUCHENKO

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Polytechnic Institute"

## PROGRAM CONTROL SYSTEM OF THE PROCESS OF CARBON PRODUCTS BURNING

*The burning process is one of the main technological processes in the production of carbon products. Since this process is characterized by significant energy consumption, there is an urgent scientific and technical task of increasing the efficiency of the process of burning carbon products, which consists in reducing energy consumption.*

*The analysis of the existing control systems for the process of burning carbon products made it possible to identify the shortcomings of the latter and to formulate a research task aimed at developing a new program control system for this process in order to increase its resource and energy saving.*

*The article proposes a program control system for the process of burning carbon products, which gives preference to existing systems where the temperature schedule is set "manually" based on the experience of the operator-technologist, which allows to calculate and implement the optimal temperature schedule in accordance with the selected criterion of optimality.*

*The purpose of the research of the control system was to analyze the dynamics of temperature changes at the characteristic points of the fired blanks, as well as the influence of the duration of the firing process and the settings of the LC-regulator on the temperature difference in the billet, where this difference is maximum.*

*A study of the influence of the setting parameters of the LC regulator of the program control system on the temperature dynamics at the characteristic points of the workpieces and on the fuel consumption during the burning process. The control system is presented, the calculation of control before the start of the technological process of burning and implementation of the calculated program without feedback. Thus, there is no possibility of taking into account drilling of various nature, which affect the technological process. In this regard, the expediency of building a real-time control system for the process of burning carbon products is shown.*

*Key words: carbon products, program control, control system, LC-regulator.*

### Постановка проблеми

Аналіз сьогоденної практичної реалізації процесу випалювання вуглецевих виробів свідчить про те, що цей процес є фактично некерованим [1–3]. Після розміщення пальника на черговій камері (після чого камера стає «камерою під вогнем») процес випалювання триває певний час за максимальної витрати палива. Тривалість цього процесу задається оператором-технологом на основі власного досвіду і статистичних даних, накопичених на попередніх кампаніях випалювання. Такий підхід забезпечує максимальну продуктивність печі випалювання щодо виробів, що обробляються.

При цьому, як свідчить практика, об'єктивні помилки в технологічній реалізації перебігу процесу та його тривалості призводять, з одного боку, до перевитрат енергоносіїв, а з іншого – до значної кількості браку кінцевої продукції.

Найвні системи керування процесом випалювання, короткий аналіз яких наведена вище, розглядають питання якості продукції та енергозбереження окремо одне від одного, без комплексного підходу до їх розв'язання в рамках оптимальної системи керування.

Створенню будь-якої оптимальної системи керування, у тому числі системи оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів, передує етап формулювання завдання оптимального керування, яке в цьому разі має передбачати комплексне вирішення питань енергозбереження процесу випалювання й забезпечення потрібної якості вуглецевої продукції.

Добре відомо [4–7; 8], що всі техніко-економічні показники процесу випалювання вуглецевих виробів пов'язані з температурним режимом його реалізації. Тому надалі для реалізації оптимального керування процесом випалювання підлягають визначенню температурний графік і тривалість цього процесу.

Коли говоримо про температурний графік, треба визначити, про яку температуру й у якій точці печі йде мова. З огляду на значну розподіленість температурного поля печі випалювання [7; 8; 9; 10–12], у різних точках печі температури та графіки їх зміни будуть суттєво відрізнятися.

За результатами попередніх досліджень [7; 9; 10–12] видається доцільним, по-перше, під час вибору тривалості процесу випалювання орієнтуватися на нижню точку заготовки в «холодній зоні», де температура найменша. По-друге, для запобігання браку вуглецевих виробів потрібно контролювати заготовку, у якій перепад температур максимальний.

Передусім потрібно з'ясувати, як саме можуть бути сформовані температурний графік і тривалість процесу випалювання. Сьогодні ці визначальні технологічні показники задає оператор-технолог. Але такий підхід, безумовно, є суб'єктивним і його результативність залежить від кваліфікації оператора-технолога.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

На жаль, сьогодні питанню створення й упровадження системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів приділено недостатньо уваги. Відомі роботи присвячені в основному питанням або контролю за температурним режимом печі випалювання, або організації самого процесу випалювання.

Так, у дослідженні [5] описана робота двох дифузійних пальників, що встановлені в склепінні камери, при тиску газу 3000 Па, що давало змогу вести процес випалювання за заданим графіком з точністю  $-50 \dots + 30$  °С. Контроль процесу зводився до вимірювання температури під склепінням камери й запису показів на вторинному приладі (самописці). Очевидно, що, крім низької точності дотримання графіка випалювання заготовок, такий спосіб керування призводив до не виправдано високої перевитрати палива і значного браку через досить великий перепад температури по висоті камери.

У зв'язку з практичною неможливістю регулювання співвідношення повітря/газ через особливість конструкції печі, а саме підсосу повітря на контакт склепіння з камерою печі,

у роботах [5–7] наведено теоретичне обґрунтування доцільності використання системи імпульсного спалювання палива для багатокамерних печей випалювання, що призводить, на думку авторів, до зменшення перевитрати палива. У праці [8] подається обґрунтування доцільності створення системи керування процесом випалювання вуглеграфітових заготовок із використанням системи імпульсного спалювання палива.

З досліджень останніх років варто виділити роботи [6; 8; 9]. У них обґрунтовано доцільність синтезу системи керування на базі штучних нейронних мереж для вирішення завдання визначення ймовірності дефектів у заготовках. Розв’язане завдання обмеженості необхідних для навчання нейронної мережі даних шляхом застосування особливої структури – автоенкодера. Порівняно із системою керування з класичним ПД-регулятором розроблена система забезпечує меншу витрату палива для досягнення продукції необхідної якості. Запропонований регулятор забезпечує менші перепади та прирости температур протягом усього процесу випалювання.

### Мета дослідження

**Мета дослідження** системи керування – проаналізувати динаміку зміни температур у характерних точках заготовок, що випалюються, а також вплив тривалості процесу випалювання й налаштувань ЛК-регулятора на перепад температур у заготовці, де цей перепад максимальний.

### Виклад основного матеріалу дослідження

#### *Система програмного керування*

Наразі пропонується інший підхід, виходячи з рекомендацій щодо швидкості підвищення температури, наданих у працях [6; 7]. Знаючи початкову температуру і приймаючи певний закон зміни температури в процесі випалювання (лінійний, кусково-лінійний, лінійний із насиченням тощо) можна сформувати шуканий температурний графік. При цьому тривалість процесу випалювання має бути задана.

У такій постановці задача оптимального керування процесом випалювання являє собою задачу лінійно-квадратичного керування з відомим критерієм оптимальності [13]:

$$I = \int_0^{T_k} [q(T(\tau) - T_{зад}(\tau))^2 + ru^2(\tau)] d\tau \quad (1)$$

або у дискретному вигляді

$$J = \sum_{k=0}^N [q(T(k) - T_{зад}(k))^2 + ru^2(k)], \quad (2)$$

де  $T_k$  – тривалість процесу випалювання,  $T(\tau)$ ,  $T(k)$  – температура в контрольній точці в момент часу  $0 \leq \tau \leq T_k$  і дискретний момент часу  $k$  відповідно;  $T_{зад}(\tau)$ ,  $T_{зад}(k)$  – задана температура в контрольній точці в момент часу  $\tau$  та в дискретний момент  $k$  відповідно;  $q$ ,  $r$  – параметри налаштування ЛК-регулятора;  $T_k = N\Delta\tau$  ( $\Delta\tau$  – крок дискретизації).

За наявності математичної моделі процесу випалювання, наприклад [6; 7], оптимальний закон керування  $u_{opt}$  може бути розрахований на початку термічної обробки заготовок у «камері під вогнем», використовуючи стандарте програмне забезпечення [14], і керування процесом випалювання може бути реалізоване у вигляді програмного керування.

Результати проведеного дослідження подано на рисунках 1–4.

Точки 1 і 2 – відповідно верхня й нижня точки заготовки, яка розташована в «гарячій зоні» з найвищими температурами. Саме різниця температур у цих точках формує максимальний перепад, який є предметом цього дослідження. Точка 3 – нижня точка заготовки в «холодній зоні», де температура найменша. Температура в цій точці визначає тривалість процесу випалювання. Процес випалювання вважався завершеним, коли температура в точці 3 досягала 1300 °С.



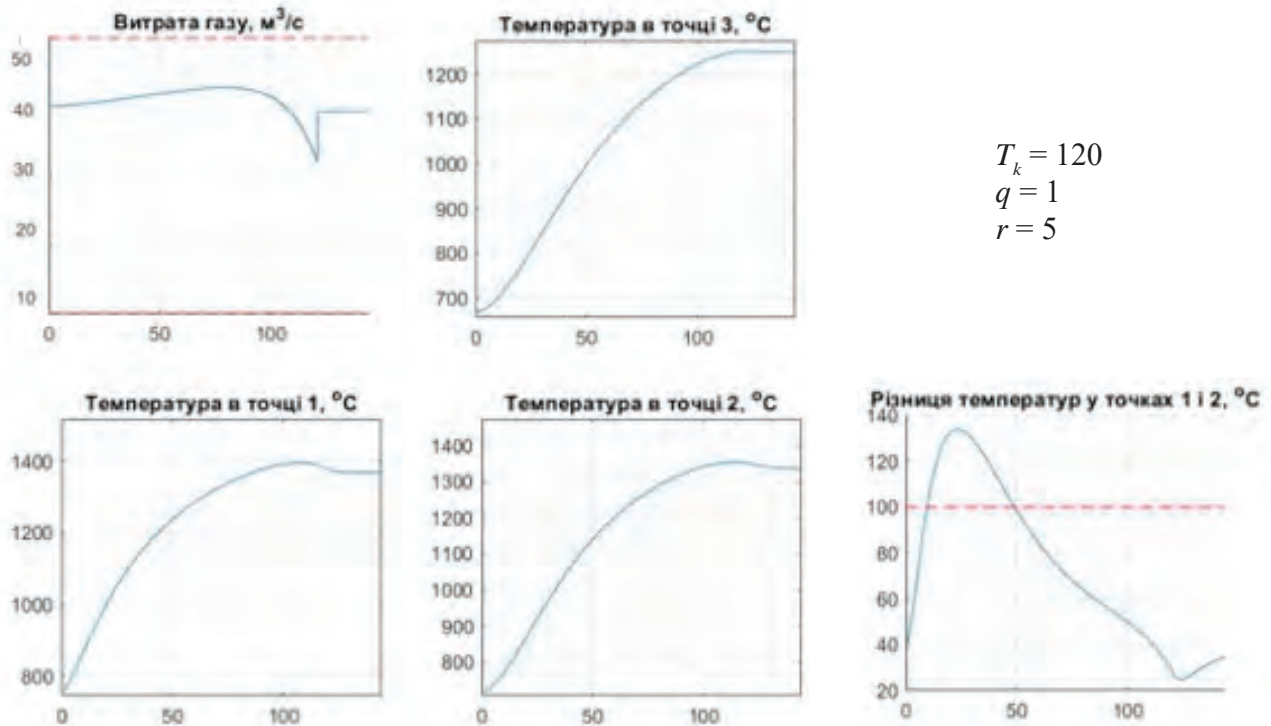


Рис. 1

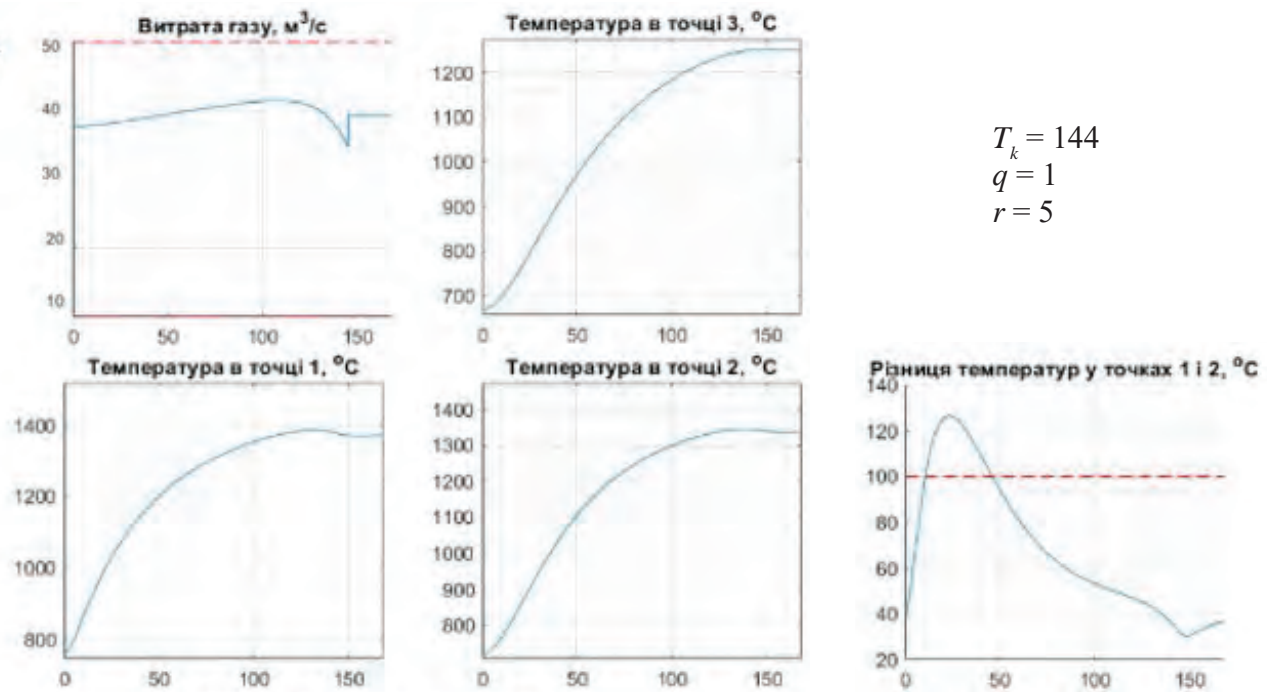


Рис. 2

Як свідчать наведені результати, характер динаміки температур у всіх точках, що розглядаються, практично не залежить ні від тривалості процесу випалювання, ні від параметрів налаштування ЛК-регулятора. Водночас збільшення тривалості випалювання (рис. 1, 2) призводить до зменшення максимального перепаду температур у найбільш «небезпечній» заготовці, що є, безумовно, позитивним моментом. Однак треба пам'ятати про те, що в цьому випадку зменшується загальна продуктивність виробництва загалом.

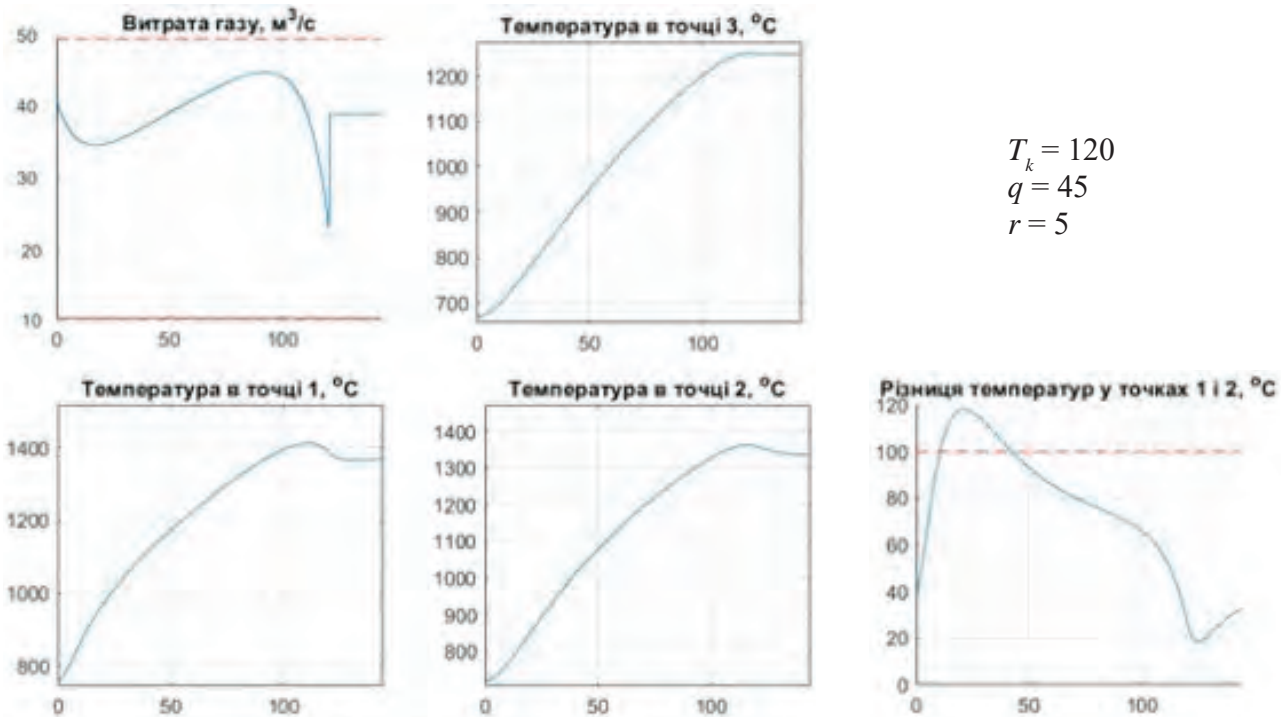


Рис. 3

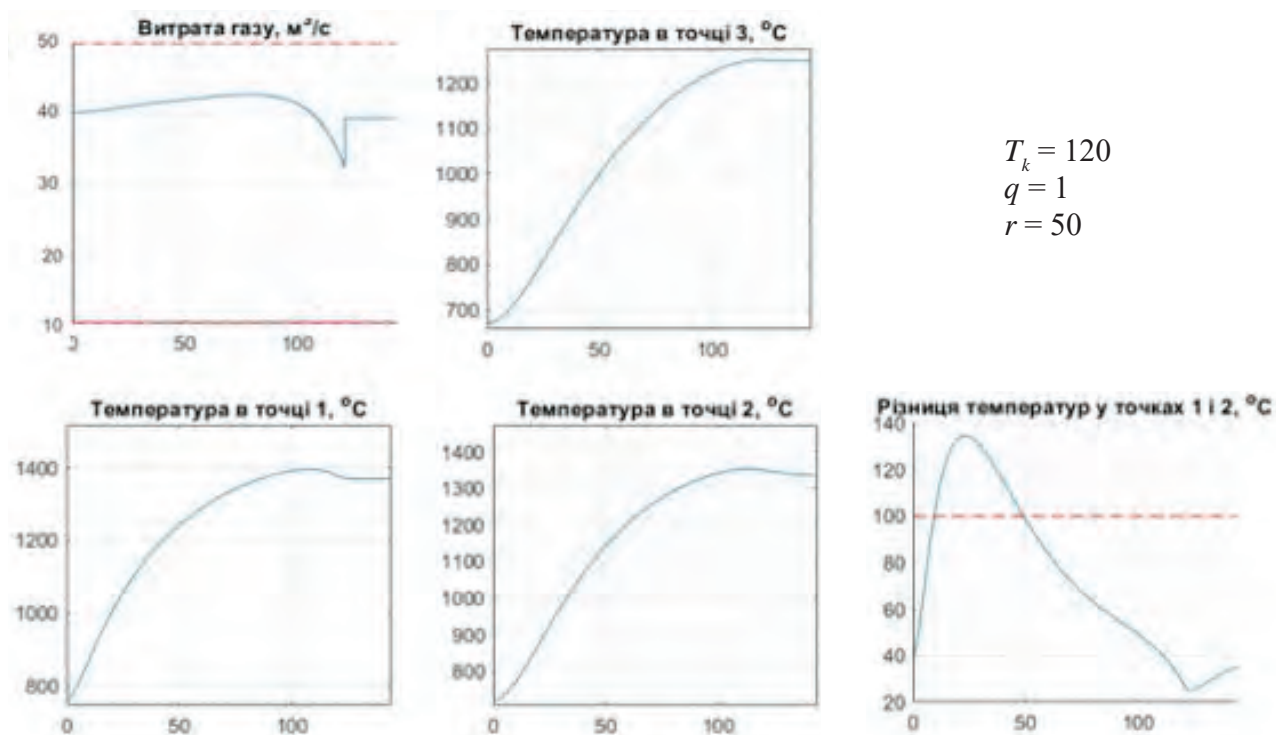


Рис. 4

Суттєвий вплив на максимальний перепад температур має налаштування параметра  $q$  регулятора (рис. 1, 3). Збільшення його величини зменшує максимальний перепад, що в принципі є очікуваним результатом.

Зміна параметра  $r$  фактично не впливає на динаміку максимального перепаду температур у заготовці, зате дає змогу витратити менше палива (рис. 4).

Наведена вище система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів має свої недоліки. Одним із них є те, що тривалість процесу випалювання задається суб'єктивно, що може призвести до погіршення техніко-економічних показників процесу та якості вуглецевих виробів.

Варто зазначити, що елемент «суб'єктивності» у визначенні тривалості процесу випалювання можна усунути, використавши зміну ентропії вуглецевих виробів як критерій тривалості процесу [15]. За такого підходу розрахувати потрібну тривалість можна за допомогою такого ітераційного алгоритму: 1) задати початкову тривалість  $T_k$ , яка наперед менша за потрібну ( $T_k < 100$  год.); 2) розв'язати задачу (1) або (2); 3) розрахувати значення температури в контрольній точці наприкінці кампанії процесу випалювання; 4) розрахувати відповідне значення ентропії  $E_k$ ; 5) знайти різницю ентропії наприкінці процесу випалювання  $E_k$  та на попередньому кроці  $E_{k-1}$ ; 6) якщо  $\Delta E = E_k - E_{k-1} \leq 0$ , то  $T_k$  – потрібна тривалість процесу випалювання; 7) якщо  $\Delta E > 0$ , то  $T_k = T_k + \delta t$  ( $\delta t$  – крок дискретизації) –  $E_{k-1} = E_k$  та перейти до п. 2.

### Висновки

Запропонована система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів, на відміну від наявних систем, де температурний графік процесу задається «вручну» на основі досвіду оператора-технолога, дає змогу розраховувати й реалізовувати оптимальний температурний графік згідно з вибраним критерієм оптимальності.

Збільшення тривалості процесу випалювання призводить до зменшення максимального перепаду температур у заготовках, що сприяє запобіганню браку готової продукції. Однак треба враховувати, що це збільшення може призвести до зменшення продуктивності виробництва загалом.

Проведено дослідження впливу параметрів налаштування ЛК-регулятора на динаміку температур у характерних точках заготовок і на витрати палива в процесі випалювання.

Представлена система програмного керування передбачає розрахунок керування до початку технологічного процесу випалювання й реалізацію розрахованої програми без зворотного зв'язку. Тим самим відсутня можливість урахування збурень різної природи, які впливають на технологічний процес. Ще більше складностей виникає в разі відключення електроживлення, що сьогодні в період дії воєнного стану не є чимось незвичним.

Розв'язати це завдання можна побудовою системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів реального часу, що й має бути предметом подальших досліджень.

### Список використаної літератури

1. Жученко Л.К. Методологічні засади дослідження підвищення ефективності технологічних процесів (термічна обробка вуглецевих матеріалів). *Філософія та науково-технічна творчість у хронотоні технічного університету* : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2020. С. 147–150.
2. Жученко Л.К., Волощук В.А. Постановка задачі оптимізації виробництва вуглеграфітової продукції на етапі випалювання. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики* : матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів. Київ, 2020. С. 4.
3. Жученко Л.К. Постановка задачі оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. № 5. С. 81–85.
4. Коротинський А.П., Жученко О.А. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів. *Гірничий вісник*. 2017. № 102. С. 174–179.
5. Supervisory control system for monitoring a pharmaceutical hot melt extrusion process / D. Markl et al. *AAPS PharmSciTech*. 2013. № 14. P. 1034–1044. DOI: 10.1208/s12249-013-9992-7

6. Підвищення ефективності випалювання вуглеграфітових заготовок. Є.М. Панов та ін. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2011. № 1. С. 25–30.
7. Коротинський А.П. Автоматизація процесу керування багатокамерними печами випалювання вуглеграфітових виробів : дис. ... докт. філософії : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ, 2020. 190 с.
8. Пулинець І.В. Теплообмін в багатокамерних печах вуглеграфітових виробів : монографія / Мін-во освіти і науки України. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 175 с.
9. Коротинський А.П., Жученко О.А. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів. *Гірничий вісник*. 2017. № 102. С. 174–179.
10. Коротинський А.П., Жученко О.А. Дослідження впливу надлишку повітря на процес випалювання вуглецевих виробів у камері «під вогнем». *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2018. № 1. С. 119–128.
11. Коротинський А.П., Жученко О.А. Дослідження впливу початкової температури повітря на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів у камері «під вогнем». *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2018. № 36. С. 201–209.
12. Коротинський А.П., Жученко О.А. Дослідження впливу витрати палива на температурні поля печі випалювання вуглецевих виробів. *Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова*. 2019. № 4. С. 3–10.
13. Жосан А.А., Кірсань Є.С. Аналіз методів моделювання об'єктів з розподіленими. *Вісник Криворізького національного університету*. 2013. № 34.
14. Korotynskiy A., Zhuchenko O. Development and investigation of the reduced mathematical model of the process of baking carbon products. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2019. № 1/8. С. 70–78.
15. Жученко Л.К., Коротинський А.П. Ентропія як показник якості вуглеграфітової продукції. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : матеріали XIX Міжнар. наук.-прак. конф. аспірантів, магістрантів і студентів*. Київ, 2021.

### References

1. Zhuchenko, L.K. (2020). Metodolohichni zasady doslidzhennia pidvyshchennia efektyvnosti tekhnolohichnykh protsesiv (termichna obrobka vuhletsevykh materialiv) – [Methodological principles of research on improving the efficiency of technological processes (thermal treatment of carbon materials)]. *Filosofia ta naukovo-tekhnichna tvorchiist u khronotopi tekhnichnoho universytetu* : III Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia. P. 147–150. [in Ukrainian]
2. Zhuchenko, L.K., Voloshchuk, V.A. (2020). Postanovka zadachi optymizatsii vyrobnytstva vuhlegrafitovoi produktsii na etapi vypaliuvannia – [Setting the problem of optimizing the production of carbon graphite products at the firing stage]. *Suchasni problemy naukovoho zabezpechennia enerhetyky : XVIII Mizhnarodna naukovo – praktychna konferentsiia molodykh vchenykh ta studentiv*. P. 4. [in Ukrainian]
3. Zhuchenko L.K. Postanovka zadachi optimalnoho keruvannia protsesom vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv – [Setting the problem of optimal management of the process of burning carbon products]. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriiia "Tekhnichni nauky"*. Vol. 5. P. 81–85. [in Ukrainian]
4. Korotynskiy, A.P. & Zhuchenko, O.A. (2017). Postanovka zadachi keruvannia protsesom vypaliuvannia u vyrobnytstvi vuhletsevykh vyrobiv – [Setting the problem of managing the firing process in the production of carbon products]. *Hirnychi visnyk*. Vol. 102. P. 174–179. [in Ukrainian]
5. Markl, D., Wahl, P.R., Menezes, J.C., Koller, D.M., Kavsek, B. & Francois, K., et al. (2013). Supervisory control system for monitoring a pharmaceutical hot melt extrusion process. *AAPS PharmSciTech*. Vol. 14. P. 1034–1044. DOI: 10.1208/s12249-013-9992-7 [in English]

6. Panov, E.M., Karvatskyi, A.Ya., Shylovych, I.L., Leleka, S.V. & Pulynets. I.V. (2011). Pidvyshchennia efektyvnosti vypaliuvannia vuhlehrafitovykh zahotovok – [Increasing the firing efficiency of carbon graphite blanks]. *Visnyk NTUU “KPI”. Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia*. Vol. 1. P. 25–30. [in Ukrainian]
7. Korotynskyi, A.P. (2020). Avtomatyzatsiia protsesu keruvannia bahatokamernymy pechamy vypaliuvannia vuhlehrafitovykh vyrobiv – [Automation of the process of controlling multi-chamber furnaces for firing carbon graphite products] : Doctor’s thesis. 190 p. [in Ukrainian]
8. Pulynets, I.V. (2014). Teploobmin v bahatokamernykh pechakhvypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv – [Heat exchange in multi-chamber furnaces of carbon graphite products] / *Min-vo osvity ta nauky Ukrainy*. Kyiv : NTUU “KPI”. 175 p. [in Ukrainian]
9. Korotynskyi, A.P. & Zhuchenko, O.A. (2017). Postanovka zadachi keruvannia protsesom vypaliuvannia u vyrobnytstvi vuhletsevykh vyrobiv – [Setting the problem of managing the firing process in the production of carbon products]. *Hirnychi visnyk*. Vol. 102. P. 174–179. [in Ukrainian]
10. Korotynskyi, A.P., & Zhuchenko, O.A. (2018). Doslidzhennia vplyvu nadlyshku povitria na protses vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv u kameri “pid vohnem” – [Study of the influence of excess air on the process of burning carbon products in a chamber “under fire”]. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. Seriiia “Tekhnichni nauky”*. Vol. 1. P. 119–128. [in Ukrainian]
11. Korotynskyi, A.P. & Zhuchenko, O.A. (2018). Doslidzhennia vplyvu pochatkovoï temperatury povitria na temperaturnyi rezhym protsesu vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv u kameri “pid vohnem” – [Study of the influence of the initial air temperature on the temperature regime of the process of burning carbon products in the chamber “under fire”]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu. Seriiia “Tekhnichni nauky”*. Vol. 36. P. 201–209. [in Ukrainian]
12. Korotynskyi, A.P. & Zhuchenko, O.A. (2019). Doslidzhennia vplyvu vytraty palyva na temperaturni polia pechi vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv – [Study of the effect of fuel consumption on the temperature fields of the furnace for burning carbon products]. *Zbirnyk naukovykh prats natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni Admirala Makarova*. Vol. 4. P. 3–10. [in Ukrainian]
13. Zhosan, A.A. & Kirsan, Ye.S. (2013). Analiz metodiv modeliuvannia obiektiv z rozpodilenyymi – [Analysis of methods of modeling objects with distributed]. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*. Vol. 34. [in Ukrainian]
14. Korotynskyi, A. & Zhuchenko, O. (2019). Development and investigation of the reduced mathematical model of the process of baking carbon products. *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. Vol. 1/8(97). P. 70–78. [in English]
15. Zhuchenko, L.K. & Korotynskyi, A. (2021). Entropiia yak pokaznyk yakosti vuhlehrafitovoi produktsii – [Entropy as an indicator of the quality of carbon graphite products]. *Suchasni problemy naukovoï zabezpechennia enerhetyky : XIX mizhnar. nauk.-prak. konf. aspirantiv, mahistrantiv i studentiv*. [in Ukrainian]

Жученко Людмила Костянтинівна – аспірантка кафедри автоматизації енергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», e-mail: liudmylazhuchenko@gmail.com, ORCID: 0009-0008-5073-7314.

Zhuchenko Liudmyla Kostiantynivna – Graduate Student at the Department of Automation of Energy Processes of the National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute”, e-mail: liudmylazhuchenko@gmail.com, ORCID: 0009-0008-5073-7314.

Є.К. ЗАВАЛЬНІЮК, О.Н. РОМАНІЮК  
Вінницький національний технічний університет  
Т.І. КОРОБЕЙНІКОВА  
Національний університет «Львівська політехніка»

## ВИСОКОПРОДУКТИВНЕ НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ ЗАФАРБОВУВАННЯ ТРИВИМІРНИХ ФІГУР НА ОСНОВІ МОДЕЛІ PIX2PIX

*У статті розроблено двоетапну систему з генеративних нейромереж для зафарбовування тривимірних фігур. Проаналізовано переваги й недоліки стандартних підходів до рендерингу тривимірних зображень. Описано особливості нейронного рендерингу. Розглянуто нейромережеві напрями генерації зафарбованих зображень із геометричних даних фігур і двовимірних ескізів, отримання геометричних даних із зображень. Описано особливості будови й використання генеративних змагальних нейромереж для формування зображень. Обґрунтовано необхідність розробки нових методів нейронного рендерингу для підвищення продуктивності зафарбовування поверхонь тривимірних фігур. Описано запропоновану систему нейромережевого зафарбовування фігур, що включає моделі Pix2Pix, для формування зображень і покращення їх якості. Розроблено набір для тренування нейромережі на основі масиву фігур ShapeNet. Запропоновано об'ємне подання інформації про вершини фігури, що використовується на вході нейромережевої системи. Описано архітектури генератора й дискримінатора Pix2Pix для зафарбовування фігур. Наведено інформацію про тривалість тренування нейромережі та використані метрики похибки. Побудовано графік зміни похибок дискримінатора й генератора під час тренування Pix2Pix для зафарбовування фігур. За допомогою метрики SSIM і тестового набору фігур обчислено рівень якості генерації зображень. Описано архітектури генератора та дискримінатора Pix2Pix для покращення якості й масштабування генерованих зображень. Побудовано графік зміни метрик помилок генератора та дискримінатора під час тренування Pix2Pix для підвищення якості зображень. Наведено приклади згенерованих двоетапною нейромережевою системою зображень зафарбованих фігур. На основі метрики SSIM оцінено якість згенерованих на другому етапі системи зображень. Порівняно швидкість зафарбовування фігур за допомогою запропонованої системи й рендера Blender Eevee. Розроблена нейромережева система дає змогу генерувати реалістичні зображення та підвищити продуктивність зафарбовування поверхонь фігур.*

*Ключові слова:* рендеринг, нейронний рендеринг, Pix2Pix, генеративні нейромережі, згорткові нейромережі.

Ye.K. ZAVALNIUK, O.N. ROMANIUK  
Vinnytsia National Technical University  
T.I. KOROBEGINIKOVA  
Lviv Polytechnic National University

## HIGHLY PRODUCTIVE NEURAL SHADING OF THREE-DIMENSIONAL FIGURES USING PIX2PIX MODEL

*In the article the generative neural networks-based two-stage system for three-dimensional figures shading is developed. The advantages and disadvantages of standard three-dimensional images rendering approaches are analyzed. The features of neural rendering are analyzed. The neural research directions of generating shaded images from figures' geometrical data and two-dimensional sketches, getting geometrical data from images are examined. The features of architecture and usage of generative adversarial networks are described. The need in the development of new neural rendering methods for increasing the productivity of three-dimensional figures' surfaces shading is justified. The proposed system for figures neural shading that contains Pix2Pix models for images formation and improving their quality is described. The development of dataset based on ShapeNet figures array for neural network training is described. The proposed volumetric representation of figures' vertices information that is used as neural system input is examined. The architectures of generator and discriminator of Pix2Pix for figures shading are described. The information about neural network training duration and used error functions is provided. The plots of discriminator's and generator's error functions changes during the Pix2Pix training for figures shading are built. Using the SSIM metric and test figures dataset the image generation quality level is evaluated. The architectures of generator and discriminator of Pix2Pix for improving the quality of generated images and their scaling are described. The plots of generator's and discriminator's error metrics changes during the training of Pix2Pix for images quality improvement are built. The examples of generated by two-stage neural system shaded figures images are provided. Using the SSIM metric the quality of generated by the second system's stage images is evaluated. The speed of figures shading using the proposed system and render Blender*

*Eevee are compared. The developed neural system allows to generate realistic images and improve the productivity of figures' surfaces shading.*

*Key words: rendering, neural rendering, Pix2Pix, generative neural networks, convolutional neural networks.*

### **Постановка проблеми**

Однією з головних вимог до сучасних тривимірних графічних систем є висока продуктивність формування зображень. Ця вимога особливо важлива в системах реального часу. На продуктивність формування зображень значно впливає вибір методів та алгоритмів рендерингу [1], що характеризується найбільшою обчислювальною складністю серед етапів графічного конвеєра. Найбільш затратною операцією рендерингу є зафарбовування [2] поверхні об'єкта. Зафарбовування поверхні об'єкта включає розрахунок нормалей вершин геометричних примітивів, інтерполяцію нормалей, розрахунок для кожної точки напрямів освітлення, відбиття до спостерігача, дзеркального відбиття. Методи, що підвищують продуктивність зафарбовування поверхонь об'єктів, мають наближено зберегти рівень якості візуалізації оригінальних методів.

Тому актуальною є розробка нових методів зафарбовування об'єктів, що забезпечать високопродуктивне формування реалістичних зображень.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Основними двома традиційними підходами [3] до рендерингу є растеризація та трасування променів. Растеризація [3] полягає в трансформації тривимірної сукупності геометричних примітивів об'єкта у двовимірний масив зафарбованих пікселів. Колір кожного пікселя враховує інформацію про освітлення, матеріал поверхні, положення камери. Метод забезпечує швидше формування зображення порівняно з трасуванням променів. Недоліком підходу є недостатньо точне відображення взаємодії променів світла з об'єктами сцени. Використання трасування променів [3] забезпечує формування фото реалістичних зображень. З камери через окремий піксель направляється промінь (або пучок променів) до поверхні об'єкта сцени. За рахунок взаємодії променя зі сценою може моделюватися його відбиття, заломлення чи блокування. На основі цієї взаємодії формується значення кольору пікселя. Основним недоліком методу є висока обчислювальна складність, тому часто трасування променів застосовується лише для формування високо реалістичних сцен.

Третім підходом до формування тривимірних зображень на основі геометрії сцени є рендеринг із використанням нейромереж (нейронний рендеринг [4]). За допомогою натренованих нейромереж можливе більш швидке формування зображення, ніж засобами стандартного рендерингу, з невеликими втратами в якості візуалізації. Недоліком підходу є те, що нейромережева генерація, на відміну від растеризації та трасування променів, не є детерміністичною. Тому під час формування зображень можливі помилки. Першим із трьох основних напрямів [5] нейронного рендерингу є генерація зображення із зображень. Вхідним зображенням можуть уважатися малорозмірні дані про фігуру або її креслення. Другий напрям [5] нейронного рендерингу полягає у формуванні зображень відносно геометричних даних. Серед можливих форм [5] подання геометрії об'єкта виділяються воксельна сітка, хмара точок, полігонна сітка. Використання на вході нейромережі геометричних даних порівняно з використанням двовимірних зображень забезпечує більш повне відображення просторових особливостей об'єктів. Третій напрям [5] належить до зворотного рендерингу та полягає в отриманні геометричних даних фігури із зображення. Стандартним підходом до генерації зображень є використання GAN (generative adversarial networks – генеративних змагальних нейромереж) [6]. GAN є двоагентною системою, що полягає в змаганні генератора й дискримінатора. Завданням генератора є згенерувати зображення такої якості, що дискримінатор не зможе відрізнити від справжнього. Зазвичай генератор є комбінацією згорткової та зворотної згорткової нейромереж (наприклад, U-Net), дискримінатор є згортковою нейромережею. Для обробки зображень застосовуються операції двовимірних згортки, а під час обробки об'ємних даних застосовується тривимірна

згортка. Іншим підходом до генерації зображень є пряме використання [5] комбінації згорткової та зворотної згорткової нейронних мереж.

Оскільки нейронний рендеринг забезпечує вигравш у продуктивності [7] формування реалістичних тривимірних сцен, актуальною є розробка систем нейронного зафарбовування об'єктів.

### Мета дослідження

**Мета статті** – розробка нейромережевої системи, що забезпечить підвищення продуктивності рендерингу тривимірних зображень.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Розглянемо загальну архітектуру системи нейромережевого зафарбовування поверхонь тривимірних фігур.

Для високопродуктивного нейромережевого зафарбовування фігур запропоновано використання системи з двох генеративних нейромереж (GAN). Архітектуру обрано з урахуванням спрямованості GAN на генерацію зображень.

Схему системи зображено на рис. 1. Перша нейромережа на вході приймає тривимірну інформацію про вершини фігури, на виході формується двовимірне зображення зафарбованої фігури розміром  $64 \times 64 \times 3$ . Друга нейромережа масштабує генероване зображення до розміру  $256 \times 256 \times 3$  та підвищує рівень його якості.



Рис. 1. Схеми запропонованої нейромережевої системи зафарбовування тривимірних фігур

Це забезпечує підвищену ефективність тренування нейромережевої системи й досить високу якість генерованих зображень.

Тренувальний набір сформований на основі вибірки з 1041 тривимірної фігури набору .obj файлів ShapeNet [8]. В основному вибірка набору включає фігури автомобілів, меблів, літаків. З кожного .obj файлу набору зчитується набір вершин і подається у вигляді куба чисел розмірністю  $64 \times 64 \times 64$  (значення вибрані з урахуванням обчислювальної складності й точності подання фігури). Об'ємне подання тривимірних фігур обрано з метою повноцінного відображення їх просторових характеристик.

Одиниця означає наявність вершини фігури в елементі об'єму, нуль означає відсутність вершини в елементі. Поділ на 64 проміжки по кожній з осей здійснюється відносно максимальних і мінімальних світових координат вершин набору. Набір сформованих об'ємних подань фігур становить вхідні тренувальні значення першого етапу нейромережевої системи. На рис. 2 зображено приклад об'ємного подання фігури автомобіля (двовимірна проекція).



Рис. 2. Проекція об'ємного подання набору вершин фігури автомобіля

Цільовими значеннями нейромережі першого етапу системи є зображення зафарбованих тривимірних фігур розміром  $64 \times 64$  (рис. 3). Для зафарбовування використано програмний засіб Blender 3.3, графічний двигун Eevee, модель освітлення Шліка.



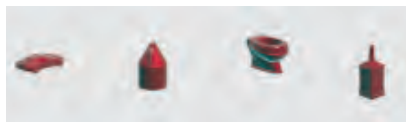


Рис. 3. Приклад цільових зображень тренувального набору

Для спрощення зафарбовування вважається, що положення камери стає, колір зафарбовування червоний.

Для етапу зафарбовування тривимірних фігур обрано архітектуру на основі генеративної нейромережі Pix2Pix [9; 10]. На рис. 4 зображено схему складової генератора, що відповідає за формування зображень. На вхід генератора подається сформований тривимірний об'єм розмірністю  $64 \times 64 \times 64 \times 1$  (InputLayer). Над кубом здійснюється тривимірна згортка (Conv3D), розмірність стає  $32 \times 32 \times 32 \times 64$ . Над результатом згортки обчислюється функція активації Leaky ReLU. Тричі виконується послідовність з тривимірної згортки, пакетної нормалізації (BatchNormalization), Leaky ReLU. Далі здійснюється тривимірна згортка та застосовується функція активації ReLU. Розмірність даних стає  $2 \times 2 \times 2 \times 512$ . Розпочинається процес зворотної згортки. Чотири рази повторюється послідовність кроків, за якої здійснюється тривимірне транспонування згорткового шару (Conv3DTranspose), пакетна нормалізація, операція виключення (Dropout, запобігає перенавченню нейромережі), конкатенація з відповідним за розмірністю результатом етапу згортки, застосування ReLU. Дані розмірністю  $32 \times 32 \times 32 \times 128$  за допомогою Conv3DTranspose перетворюються в куб розміром  $64 \times 64 \times 64 \times 1$ . Після видалення одиничного виміру куба до нього застосовуються дві операції двовимірної згортки (Conv2D). Розмірність куба стає  $64 \times 64 \times 3$ . Останнім етапом перетворень є застосування до куба функції активації tanh.

На рис. 5 зображено схему складової дискримінатора, що відрізняє сформовані у Blender зображення фігур від згенерованих. На вхід дискримінатора подаються тензор геометрії фігури розмірністю  $64 \times 64 \times 64 \times 1$  і тензор зображення розмірністю  $64 \times 64 \times 3 \times 1$ . Обидва тензори об'єднуються в тензор розмірністю  $64 \times 64 \times 67 \times 1$ . Двічі над тензором здійснюються тривимірна згортка й застосування функції Leaky ReLU. Тричі повторюється послідовність із тривимірної згортки, пакетної нормалізації та застосування Leaky ReLU. Після наступної тривимірної згортки розмір тензора стає  $4 \times 4 \times 5 \times 1$ . До тензора застосовується сигмоїдна функція активації. Вихідний тензор дискримінатора використовується для визначення, чи є зображення згенерованим.

Для тренування нейромережі використано 100 ітерацій, кожна з яких включала 1041 крок. Тривалість одного кроку – близько 90 мс. Використано три функції помилки –  $d1$ ,  $d2$ ,  $g$ .  $d1$  є бінарною крос-ентропією та подає здатність дискримінатора виявляти створені у Blender зображення.  $d2$  також є бінарною крос-ентропією та подає здатність дискримінатора виявляти згенеровані зображення.  $g$  подає точність генерації зображень і поєднує метрику MSE (mean squared error) зі змагальною похибкою (відображає здатність генератора «обманювати» дискримінатор). На рисунку 6 зображено графік зміни  $d1$ ,  $d2$ ,  $g$  під час тренування нейромережі.

Тестовий набір для перевірки роботи нейромережі включає 77 пар об'ємів фігур (вибірка з набору ShapeNet [8]) і цільових зображень.

На рис. 7 зображено пари сформованих у Blender і генерованих зображень на основі фігур тестового набору.

Для оцінювання якості генерації зображень з фігур тестового набору використано метрику SSIM [11; 12], що враховує структурну подібність між зображеннями. Оцінкою якості генерації є відсоток зображень, що відповідають рівням метрики MOS [13; 14] «чудово» та «добре». Значення SSIM діапазону [0.93,1] відповідають [11] MOS «чудово», значення діапазону [0.85,0.93] – MOS «добре», значення діапазону [0.75,0.85] – MOS «прийнятно». Близько 85% генерованих зображень відповідають оцінкам, вищим за «прийнятно». 100% генерованих зображень відповідають оцінкам, не меншим за «прийнятно».

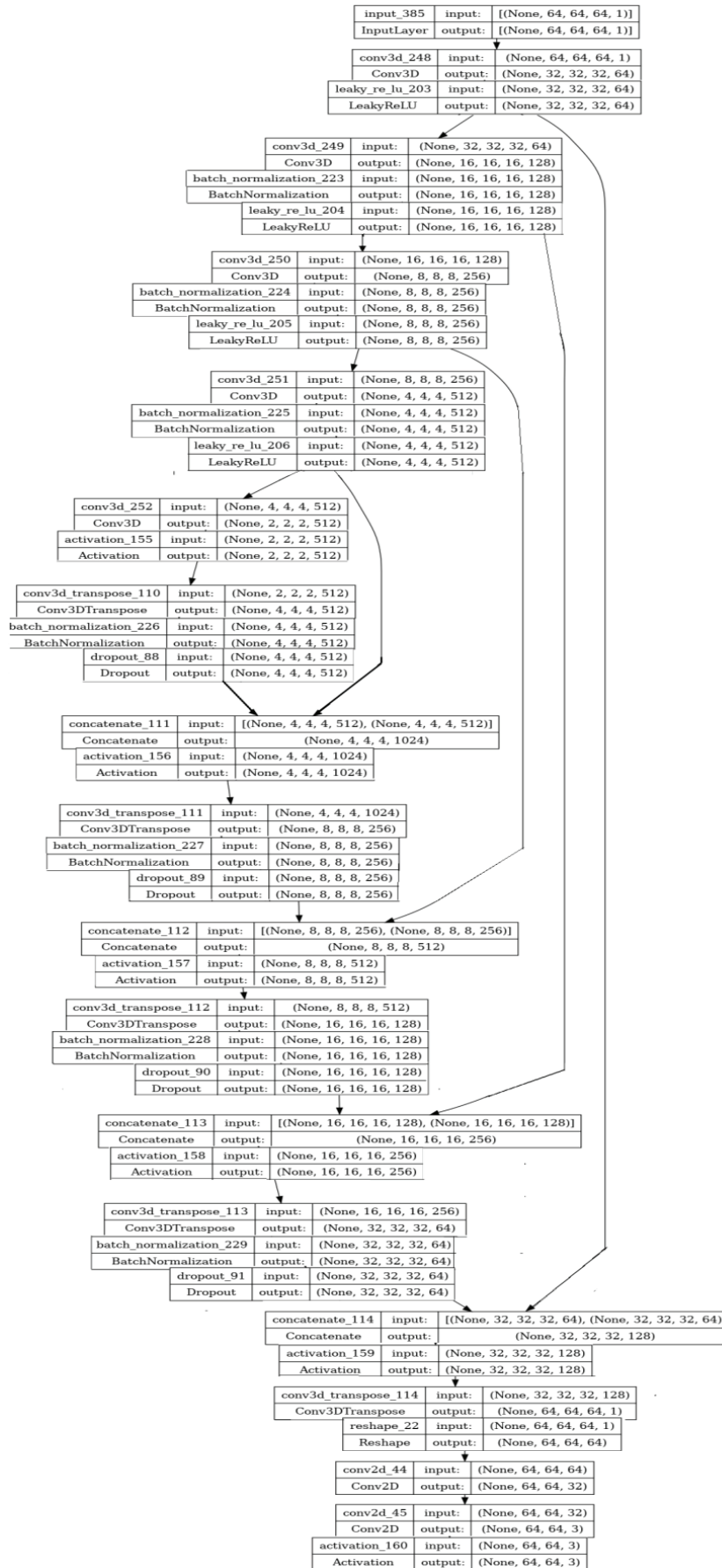


Рис. 4. Схема генеративної складової Pix2Pix

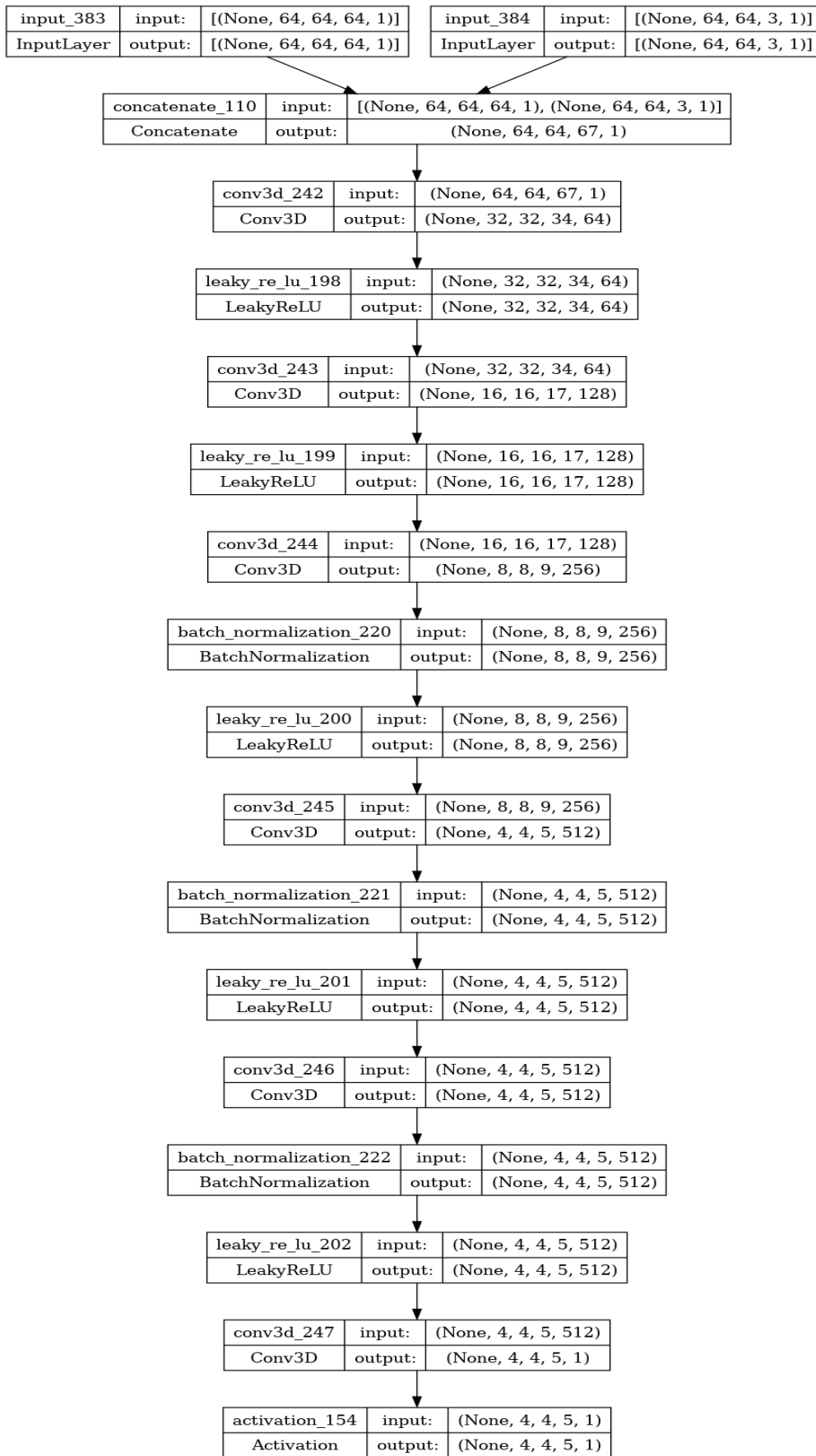


Рис. 5. Схема дискримінатора Pix2Pix

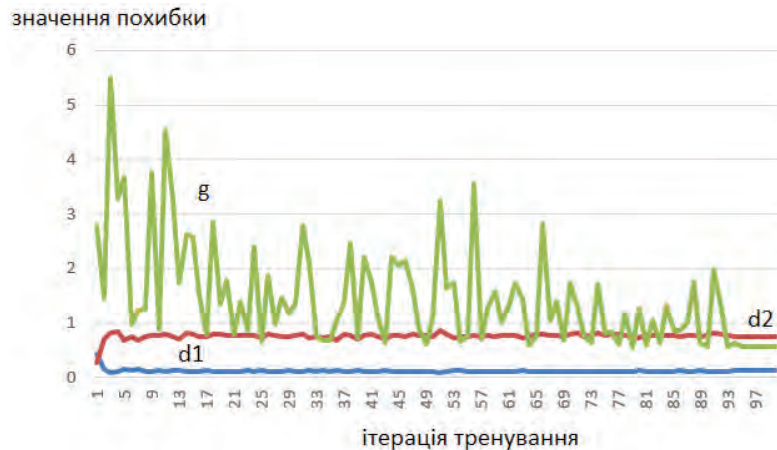


Рис. 6. Графік зміни [0.93,1] під час тренування нейромережі



Рис. 7. Згенеровані та сформовані у Blender (справжні) зображення тестових фігур

Розглянемо етап покращення якості та збільшення розміру генерованих зображень.

Описана архітектура нейромережі для генерації зображення з об'єму тривимірної фігури забезпечує кінцеву розмірність  $64 \times 64$ . Також якість генерованих зображень неповною мірою відповідає якості цільових зображень. Тому важливою є можливість збільшення зображення з покращенням рівня його якості. Як кінцевий розмір зображення обрано розмірність  $256 \times 256$ . Для покращення якості генерованих зображень аналогічно використано архітектуру Pix2Pix [9; 10].

На вході генератора нейромережі подається генероване зображення розміром  $64 \times 64$  посеред білого квадрату розміром  $256 \times 256$ . Замість операцій тривимірної згортки, використовуються операції двовимірної згортки, оскільки в цьому випадку обробляється двовимірне зображення. Вхідне зображення піддається двовимірній згортці, до результату згортки застосовується функція Leaky ReLU. Шість разів повторюється послідовність із двовимірної згортки, пакетної нормалізації та застосування Leaky ReLU. Фаза згортки завершується двовимірною згорткою та застосуванням функції ReLU. Розмірність тензора становить  $1 \times 1 \times 512$ . Далі тричі повторюється послідовність зі зворотної двовимірної згортки, пакетної нормалізації, виключення, об'єднання тензора з відповідним результатом фази згортки, застосування ReLU. Чотири рази повторюється аналогічна послідовність без операції виключення. Останніми етапами генератора є зворотна двовимірна згортка й застосування функції активації tanh, після чого формується фінальне зображення розміром  $256 \times 256 \times 3$ .

На вхід дискримінатора подаються згенероване генератором і сформоване у Blender зображення розміром  $256 \times 256 \times 3$ . Зображення об'єднуються в тензор розміром  $16 \times 16 \times 1$ . Після двовимірної згортки тензора й застосування Leaky ReLU чотири рази повторюється послідовність з двовимірної згортки, пакетної нормалізації, використання Leaky ReLU. Після двовимірної згортки тензор має розмір  $16 \times 16 \times 1$ . До тензора застосовується сигмоїдна функція активації.

Схема архітектури складової дискримінатора Pix2Pix зображена на рис. 8. Схема архітектури складової генератора Pix2Pix зображена на рис. 9.

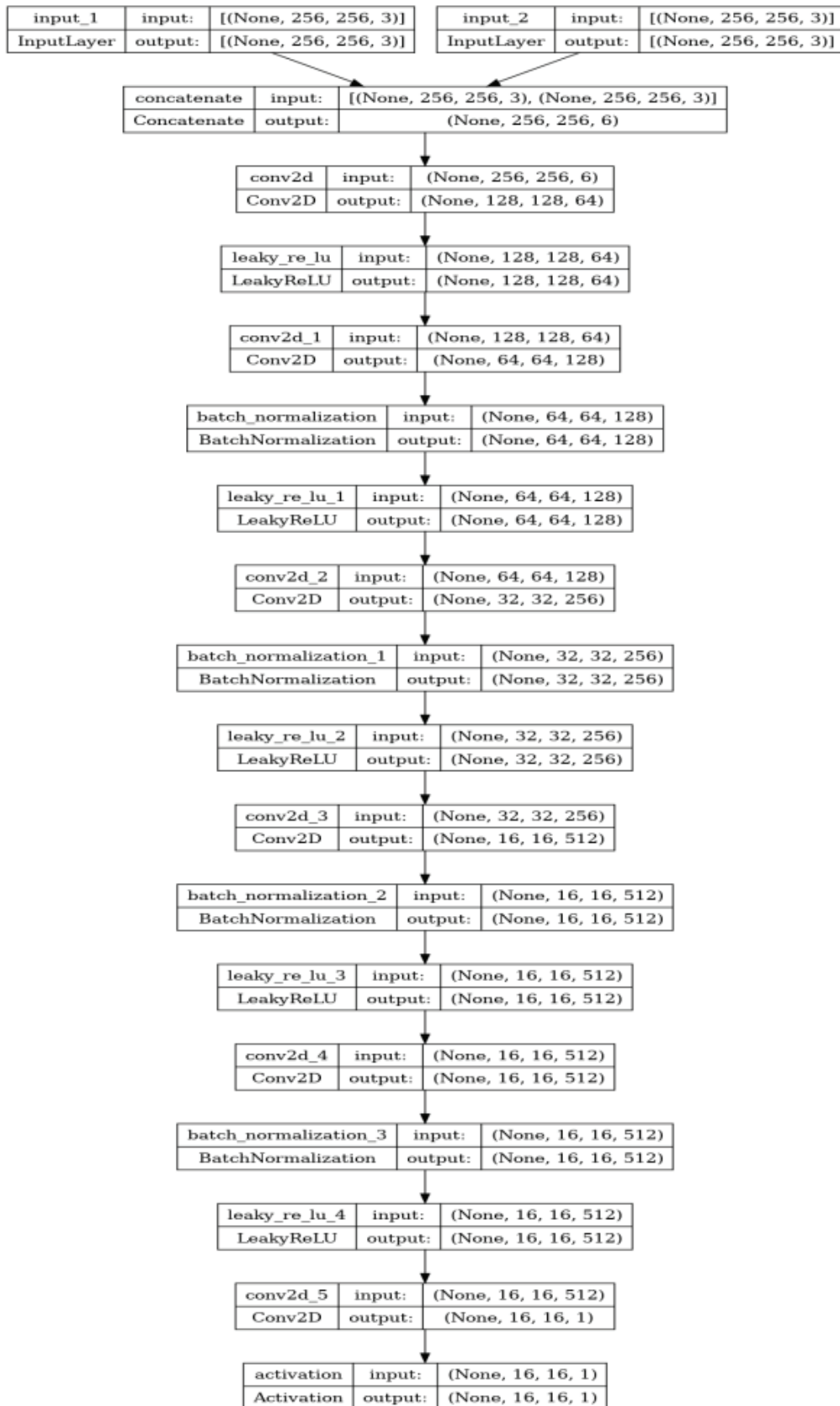


Рис. 8. Архітектура дискримінатора Pix2Pix для покращення якості генерованих зображень

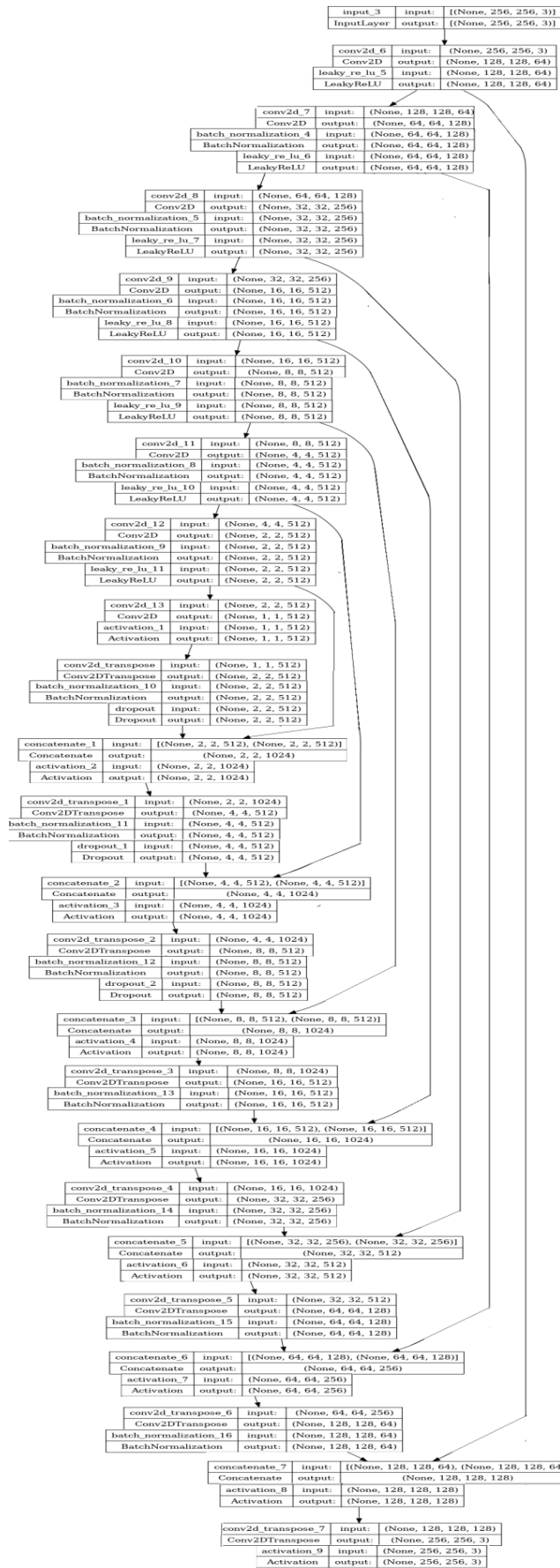


Рис. 9. Архітектура генератора Pix2Pix для покращення якості генерованих зображень

Тренування Pix2Pix для підвищення якості генерованих зображень здійснювалося 100 ітерацій, кожна ітерація вміщувала 1041 крок. Тривалість кроку становила близько 80 мс. Тренувальний набір включає 1041 згенероване першою нейромережею зображення та відповідні сформовані у Blender цільові зображення розміром  $256 \times 256 \times 3$ .

На рис. 10 зображено графік зміни  $d1$ ,  $d2$ ,  $g$  під час тренування нейромережі для підвищення якості генерованих зображень.

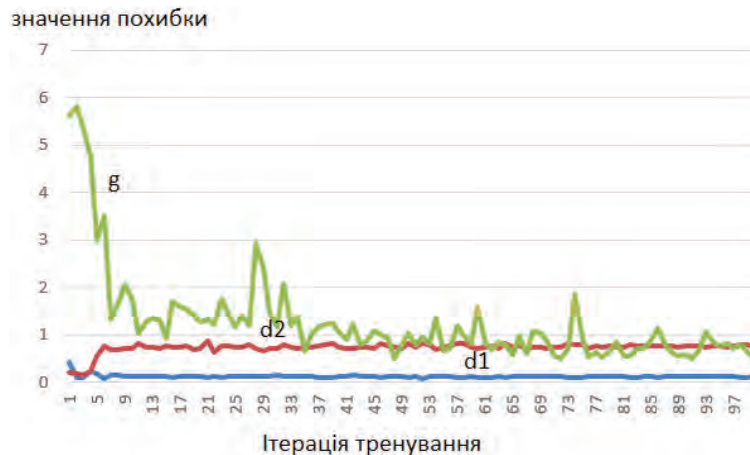


Рис. 10. Графік зміни  $d1$ ,  $d2$ ,  $g$  під час тренування нейромережі для підвищення якості генерованих зображень

Тестовий набір для перевірки точності роботи другої нейромережі включає 77 пар генерованих і цільових зображень розміром  $256 \times 256 \times 3$ .

На рис. 11 зображено приклади покращених генерованих зображень нейромережею (на основі фігур тестового набору).

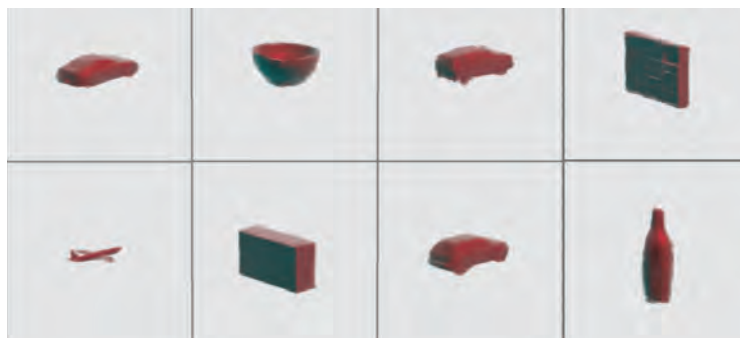


Рис. 11. Приклади покращених генерованих зображень другою нейромережею

### Список використаної літератури

1. Романюк О.Н. Комп'ютерна графіка : навчальний посібник. Вінниця : ВДТУ, 1999. 130 с.
2. Романюк О.Н., Романюк С.О., Романюк О.В. Основні процедури графічного конвеєра. *Інформаційні технології в культурі, мистецтві, освіті, науці, економіці та бізнесі* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 2022. С. 44–47.
3. Saleem U. Ray Tracing vs Rasterized Rendering – Explained. *Appuals*. URL: <https://appuals.com/ray-tracing-vs-rasterized-rendering-explained/> (accessed 25.08.2023).
4. The Overview of Neural Rendering / E.K. Zavalniuk et al. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2023. Issue № 27. Part 1. P. 129–134.
5. RenderNet: A deep convolutional network for differentiable rendering from 3D shapes / T. Nguyen-Phuoc et al. *NeurIPS 2018*. Montreal, 2018. P. 7891–7901.

6. Generative adversarial networks / I. Goodfellow et al. *Communications of the ACM*. 2020. Issue 11. P. 139–144.
7. Harris-Dewey J., Klein R. Generative Adversarial Networks for Non-Raytraced Global Illumination on Older GPU Hardware. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*. 2022. № 1. P. 1–7.
8. ShapeNet: official web site. URL: <https://shapenet.org> (accessed 25.08.2023).
9. Brownlee J. How to Develop a Pix2Pix GAN for Image-To-Image Translation. *MachineLearningMastery*. URL: <https://machinelearningmastery.com/how-to-develop-a-pix2pix-gan-for-image-to-image-translation/> (accessed on: 25.08.2023).
10. Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks / P. Isola et al. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Honolulu, 2017. P. 5967–5976.
11. An approach to correlation of QoE metrics applied to VoD service on IPTV using a Diffserv Network / D. Botia et al. *IEEE LATINCOM 2012*. Cuenca, 2012. P. 140–144.
12. Завальнюк Є.К., Романюк О.Н. Огляд метрик порівняння якості зображень. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції. Вінниця, 2023. С. 571–574.
13. The Analysis Of Subjective Metrics and Expert Methods for Image Quality Assessment / O.N. Romanyuk et al. *Intellektuelles Kapital – die Grundlage für innovative Entwicklung: Technik, Informatik, Landwirtschaft. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft»*. Karlsruhe : ScientificWorld-NetAkhatAV, 2023. 174 p.
14. Streijl R.C., Winkler S., Hands D. Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives. *Multimedia Systems*. 2016. № 2. P. 213–227.

#### References

1. Romanyuk, O. N. (1999). *Kompiuterna hrafika : Navchalnyi posibnyk – [Computer Graphics: a Tutorial]*. Vinnytsia : VDTU. [in Ukrainian]
2. Romanyuk, O.N., Romanyuk, S.O. & Romanyuk, O.V. (2022). Osnovni protsedury hrafichnoho konveiera – [Basic Procedures of the Graphic Pipeline], *Informatsiini tekhnologii v kulturi, mystetstvi, osviti, nauksi, ekonomitsi ta biznesi : materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – [Information technologies in culture, art, education, science, economy and business : proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference]*. Kyiv. [in Ukrainian]
3. Saleem, U. (2021). Ray Tracing vs Rasterized Rendering – Explained. *Appuals*. URL: <https://appuals.com/ray-tracing-vs-rasterized-rendering-explained/>
4. Zavalniuk, E.K., Romanyuk, O.N., Korobeinikova, T.I., Titova, N.V. & Romanyuk, S.O. (2023). The Overview of Neural Rendering. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. Vol. 27. Part 1. P. 129–134. doi: 10.30890/2567-5273.2023-27-01-060
5. Nguyen-Phuoc, T., Li, C., Balaban, S. & Yang, Y.-L. (2018). RenderNet: A deep convolutional network for differentiable rendering from 3D shapes, *NeurIPS 2018*. Montreal.
6. Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A. & Bengio, Y. (2020). Generative adversarial networks. *Communications of the ACM*. Vol. 11. P. 139–144. doi: 10.1145/3422622
7. Harris-Dewey, J. & Klein, R. (2022). Generative Adversarial Networks for Non-Raytraced Global Illumination on Older GPU Hardware. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*. Vol. 1. P. 1–7. doi: 10.18178/ijeee.10.1.1-6
8. ShapeNet. (2023). Official site. URL: <https://shapenet.org>
9. Brownlee, J. (2021). How to Develop a Pix2Pix GAN for Image-To-Image Translation. *MachineLearningMastery*. URL: <https://machinelearningmastery.com/how-to-develop-a-pix2pix-gan-for-image-to-image-translation/>



10. Isola, P., Zhu, J.-Y., Zhou, T. & Efros, A. (2017). Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks, *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Honolulu.
11. Botia, D., Gaviria, N., Menedez, J. & Bermejo, D.J. (2012). An approach to correlation of QoE metrics applied to VoD service on IPTV using a Diffserv Network. *IEEE LATINCOM 2012*. Cuenca.
12. Zavalniuk, Ye.K. & Romanyuk, O.N. (2023). Ohliad metryk porivniannia yakosti zobrazhen – [The Overview of Images Quality Evaluation Metrics]. *Molodvnautsi: doslidzhennia, problemy, perspektyvy (MN-2023)* : Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii – [Youth in Science: Research, Problems, Prospects (YS-2023) : Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference]. Vinnytsia. [in Ukrainian]
13. Romanyuk, O.N., Romanyuk, O.V., Titova, N.V., Romanyuk, S.O. & Zavalniuk, E.K. (2023). The Analysis Of Subjective Metrics and Expert Methods for Image Quality Assessment. *Intellektuelles Kapital – die Grundlage für innovative Entwicklung: Technik, Informatik, Landwirtschaft* : Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft» – [Intellectual capital – the basis for innovative development: technology, computer science, agriculture : «European Science» monographic series]. P. 131–138. Karlsruhe : ScientificWorld-NetAkhatAV.
14. Streijl, R.C., Winkler, S. & Hands, D. (2016). Mean opinion score (MOS) revisited: methods and applications, limitations and alternatives. *Multimedia Systems*. Vol. 2. P. 213–227. doi: 10.1007/s00530-014-0446-1

Завальнюк Євген Костянтинович – аспірант кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету, e-mail: qq9272627@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1202-4653.

Романюк Олександр Никифорович – д.т.н., професор, завідувач кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету, e-mail: rom8591@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2245-3364.

Коробейнікова Тетяна Іванівна – к.т.н., доцент кафедри безпеки інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: tetianakorobeinikova@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2487-8742.

Zavalniuk Yevhen Kostiantynovych – Ph.D. Student at the Department of Software Engineering of the Vinnytsia National Technical University, e-mail: qq9272627@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1202-4653.

Romanyuk Oleksandr Nykyforovych – D.Sc., Professor, Head of the Department of Software Engineering of the Vinnytsia National Technical University, e-mail: rom8591@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2245-3364.

Korobeinikova Tetiana Ivanivna – Ph.D., Associate Professor at the Department of Information Technology Security of the Lviv Polytechnic National University, e-mail: tetianakorobeinikova@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2487-8742.

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБЧИСЛЕНЬ У РОЗПОДІЛЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ЗА ДОПОМОГОЮ БІБЛІОТЕКИ MPI

*Розвиток обчислювальної техніки, яка характеризується збільшенням кількості даних і масивним різноманітним паралелізмом, висуває перед розробниками нові виклики. Традиційно, розроблення масштабованих програм виконується на обчислювальному ядрі, ігноруючи продуктивність моделювання. Для додатків із меншим виходом, ніж зараз, учені можуть архівувати результати моделювання для подальшої інтерпретації. Однак для програм екстремального масштабу вихідні дані часто містять занадто багато даних для зберігання в основній пам'яті або обмежені шириною смуги вводу-виводу. Отже, зараз існує потреба в розробленні масштабованих додатків, які включають моделювання, імітацію, аналіз і візуалізацію.*

*Метою дослідження є розроблення паралельного розподіленого методу моделювання геометричних об'єктів із використанням функціонального підходу бібліотеки MPI. У статті подано опис роботи алгоритму «маршируючих кубів» у розподіленій системі, проаналізовано властивості і практичне застосування під час побудови об'єктів із використанням паралельного програмування бібліотеки MPI й OpenMP. Проаналізовано розроблення ефективного паралельного програмного компонента, який, окрім прямого рендерингу, дає змогу ефективно зберігати, будувати геометричні моделі й може водночас використовувати кілька пристроїв. Подано приклади побудови об'єктів у середовищі Qt Creator.*

*Ці результати будуть корисними для теоретичних і практичних досліджень візуального представлення моделей із розподіленою пам'яттю. Моделі, побудовані за допомогою вдосконаленого алгоритму «маршируючих кубів», дають можливість розв'язати деякі завдання моделювання без великих витрат часу і прийняти належні рішення стосовно побудови об'єктів.*

*Отже, побудова тривимірних об'єктів за допомогою функціонального підходу може бути більш ефективною завдяки використанню бібліотеки розподіленого підходу MPI.*

*Ключові слова: «маршируючі куби», розподілена пам'ять, MPI, R-функції.*

A.V. KALIUSHNIAK  
Zaporizhzhia National University

## COMPUTATION EFFICIENCY ENHANCEMENT IN DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEMS WITH THE MPI LIBRARY ASSISTANCE

*The development of computing technology, characterized by an increase in the amount of data and massive and diverse parallelism, poses new challenges to developers. Traditionally, the development of scalable applications has been carried out on the computer core, ignoring simulation performance.*

*For applications with lower output than currently available, scientists can archive simulation results for later interpretation. However, for applications of extreme scale, the data output often contains too much data to be stored in the main memory or is limited by the I/O bandwidth. Hence, there is a current necessity to develop scalable applications that include modeling, simulation, analysis, and visualization.*

*The objective of the study is to develop a parallel-distributed method of modeling geometric objects using the functional approach of the MPI library. This article is focused on the description of the operation of the “marching cubes” algorithm in a distributed system, the analysis of its properties and practical application in the construction of objects using parallel programming of the MPI and Open MP libraries.*

*The development of an effective parallel software component is analyzed, which, in addition to direct rendering, enables efficient storage and construction of geometric models and is able to use several devices simultaneously. The examples of building objects in the Qt Creator environment are also presented.*

*The results will be beneficial for theoretical and practical research on the visual representation of models with distributed memory.*

*Models built by means of the improved “marching cubes” algorithm enables to solve some modeling problems in a time-consuming way and make appropriate decisions regarding the object construction.*

*Therefore, 3D objects building based on a functional approach can be more efficient by using the MPI distributed approach library.*

*Key words: “marching cubes”, distributed memory, MPI, R-function.*

### Постановка проблеми

Розбиття на ізоповерхні є фундаментальною операцією для багатьох наукових досліджень. Наприклад, ізоповерхні дають змогу перевіряти особливості тканин і форми органів у медичному аналізі, форму і взаємодію між молекулами в програмах біоінформатики й місцеві опади за результатами вимірювань погодних радіолокаторів.

Ізоповерхні скалярних полів, визначених над кубічними сітками, є важливими в широкому діапазоні застосувань, таких як медична візуалізація, геофізична зйомка, фізика й обчислювальна геометрія. Основна проблема полягає в тому, що кількість елементів зростає стосовно щільності вибірки, а величезні обсяги даних висувають жорсткі вимоги до потужності обробки та пропускну здатності пам'яті. Це особливо справедливо для програм, які потребують інтерактивної візуалізації скалярних полів.

Збільшення гетерогенних, масово паралельних архітектур ускладнило досягнення масштабованості й портативності. Наукові обчислювальні програми традиційно покладаються на бібліотеки OpenMP і MPI.

Але вимагати від розробників програмного забезпечення явно керувати ієрархіями пам'яті й обмежувати переміщення даних стає все більш обтяжливим і менш переносним. Поширення нових інструментів, доступних розробнику, бібліотек дали можливість ефективно писати продуктивні додатки. Навіть із новими інструментами деякі алгоритми можуть не масштабуватися в гетерогенних середовищах або різних паралельних парадигмах. Розуміння впливу вибору інструменту на продуктивність у реальних програмах до реалізації є необхідним для розроблення ефективних програм [1].

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасний розвиток дав змогу провести багато досліджень щодо обробки об'ємних даних на графічних процесорах (GPU), оскільки графічні процесори спеціально розроблені для виконання великих обчислювальних завдань із високими вимогами до пропускну здатності пам'яті, будуючись на простому й масовому паралелізмі замість CPU. Об'ємна трансляція – це одна з технік візуалізації скалярних полів, яка успішно реалізована на графічних процесорах.

Для заощадження часу та зменшення витрат реалізовано функціональний підхід геометричного моделювання в розподілених комп'ютерних системах із використанням MPI й алгоритму «маршируючих кубів». Задля кращого вивчення продуктивності візуалізації в численних робочих процесах і системах використано ОС Linux.

Існує багато альтернативних алгоритмів, таких як метод «Скелі», метод «Канейро» та «МТб», але під час вирішення прикладних завдань, пов'язаних із візуалізацією геометричних об'єктів, краще за все використовувати алгоритм «маршируючих кубів», так як важлива топологічна точність одержуваної поверхні.

### Мета дослідження

**Метою дослідження** є розроблення паралельного розподіленого методу моделювання геометричних об'єктів із використанням функціонального підходу бібліотеки MPI.

### Виклад основного матеріалу дослідження

**1. «Маршируючі куби».** Тривимірна побудова поверхонь зображень – важливе завдання, яке важко реалізувати на практиці. З усіх методів вилучення поверхонь зі скалярних полів алгоритм «маршируючих кубів» найбільш популярний завдяки його простоті. У статті розглядається застосування розподілених обчислень за допомогою бібліотеки MPI й алгоритму «маршируючих кубів». Розроблено надійний та ефективний алгоритм для побудови поверхонь зображень за допомогою функціонального підходу.

«Маршируючі куби» є найбільш широко використовуваною технологією для виділення ізоповерхні з тривимірних скалярних полів, які також називають об'ємними наборами даних. Об'ємний набір даних – це тривимірний масив кубічних елементів, комірок зі значеннями, пов'язаними з вісьма кутами. Ізоповерхня – це поверхня, на якій усі точки мають значення, що дорівнюють заданому користувачем пороговому значенню [2].

Комірка перетинається ізоповерхнею, якщо вона містить обидва значення вище та нижче за рівнозначну. Алгоритм «маршируючих кубів» витягує ізоповерхню по частинах, обробляючи комірки одну за одною.

Алгоритм припускає, що вихідні дані є дискретним тривимірним регулярним полем даних, визначеним на даних. Коли куб перетинає поверхню, алгоритм спочатку обчислює пересічні вершини поверхні й ребер куба за допомогою техніки лінійної інтерполяції, а потім з'єднує вершини, щоб утворити трикутники, які є апроксимацією поверхні в кубі. Після обходу всіх кубів виділяється повна поверхня.

Алгоритм обробляє кожен куб незалежно, у результаті одна й та ж вершина може бути обчислена до чотирьох разів у сусідніх комірках. Обчислення повторюваних вершин є серйозним недоліком, оскільки дублювання даних збільшує розмір ізоповерхні без додавання будь-якої корисної інформації. Дублювання може спричинити значні проблеми з продуктивністю візуалізації ізоповерхні й наступних етапів обробки [3].

Тому запропоновано рішення для ефективного розв'язання цієї проблеми за допомогою використання кількох допоміжних структур даних. Координати вершини обчислюються лише під час першого розгляду відповідного активного ребра. Координати вставляються в таблицю вершин, а індекс, що відповідає положенню вершини в таблиці, зберігається в правильній позиції однієї з п'яти структур даних допоміжного масиву (рис. 1).

У загальній комірці (тобто комірці, яка не знаходиться на межі об'єму) попередньо розглянуто дев'ять ребер. Таким чином, загальна активна комірка може створити не більше ніж три нові вершини. Значення в допоміжних структурах даних оновлюються під час подальшої обробки всіх комірок.

```
void MarchingCubesOriginal(int ncellsX, int ncellsY, int ncellsZ, float minValue, QVector<QVector4D>
    &points, Intersection intersection, QVector<Triangle> &triangles)
{
    printf("Original\n");
    int numTriangles = 0;
    int YtimeZ = (ncellsY + 1) * (ncellsZ + 1);

    triangles.resize(3 * ncellsX * ncellsY * ncellsZ);
    for(int i=0; i < ncellsX; i++) //x axis
        for(int j=0; j < ncellsY; j++) //y axis
            for(int k=0; k < ncellsZ; k++) //z axis
            {
                //initialize vertices
                QVector4D verts[8];
                int ind = i*YtimeZ + j*(ncellsZ+1) + k;
                /*(step 3)*/ verts[0] = points[ind];
                verts[1] = points[ind + YtimeZ];
                verts[2] = points[ind + YtimeZ + 1];
                verts[3] = points[ind + 1];
                verts[4] = points[ind + (ncellsZ+1)];
                verts[5] = points[ind + YtimeZ + (ncellsZ+1)];
                verts[6] = points[ind + YtimeZ + (ncellsZ+1) + 1];
                verts[7] = points[ind + (ncellsZ+1) + 1];
            }
}
```

Рис. 1. Реалізація алгоритму

Паралельна обробка є відповідним підходом для вирішення проблеми збільшення розміру даних, і пристрої, оснащені графічними процесорами (GPU), є відповідною платформою для виконання аналізу даних паралельно над структурованими даними як об'ємними наборами даних. Окрім продуктивності, бажані переваги.

Особливостями паралельної реалізації алгоритму «маршируючих кубів» для GPU є масштабованість у вхідних наборах даних, яка може оброблюватися, мати високу якість отриманих ізоповерхонь і можливість підключати програмне забезпечення до різних візуалізацій.

**2. Реалізація розподіленого підходу.** Як стандарт MPI широко прийнятий у високопродуктивних обчислювальних системах, оскільки він забезпечує незалежну від мови платформу. Він забезпечує зв'язки з мовами C, C++ і Fortran, що робить його можливим інструментом у практиці програмування. MPI має такі переваги, як хороша мобільність і висока ефективність, і може використовуватися в гетерогенних середовищах. Існує багато різних безкоштовних, ефективних і практичних версій MPI [3].

У паралельному програмуванні існує шість найбільш часто використовуваних базових інтерфейсів MPI. Розроблення програм у розподіленій системі ускладнюється через проблему ресурсів (кількість вузлів, їх архітектура, ефективність), визначаються вже в момент оброблення мережею виконання завдання. Також, незважаючи на високий рівень продуктивності бібліотеки MPI, сама технологія має недоліки (складність написання програм, необхідність надмірної специфікації типів даних у переданих повідомленнях) [4].

Паралельна реалізація «маршируючих кубів» розроблена шляхом поділу 3D-скалярного зображення на прямокутні секції. Вхідні параметри керують розміром кожного розділу вздовж  $x$ ,  $y$  і  $z$ . Потім кожен розділ обробляється окремо. Кожен потік MPI заповнює локальні вихідні змінні точки, нормалі й трикутники. Точки й нормалі містять вектор сітки. Трикутники містять вектор із трійки індексів, де індекси стосуються значень у точках і нормалях. Кожен потік обробляє розділи, призначені йому MPI (рис. 2).

```

std::vector<TriangleForMPI> triangle_mpi;
int YtimeZ = (ncellsY + 1) * (ncellsZ + 1);
int total_size = ncellsX * ncellsZ * ncellsY;
QVector4D verts[8];
QVector3D intVerts[12];

if(id == MASTER_ID)
{
    int local_size = total_size / nb_procs;
    int start_l = local_size * id;
    int numTriangles = 0;
    for(int l=start_l; l < start_l + local_size; l++)
    {
        //initialize vertices
        //get the index
        int cubeIndex = int(0);
        for(int n=0; n < 8; n++)
        {
            if(verts[n].w() <= minValue) cubeIndex |= (1 << n);
        }
        //check if its completely inside or outside
        //get intersection vertices on edges and save into the array
        if(edgeTable[cubeIndex] & 1) intVerts[0] = intersection(verts[0], verts[1], minValue);
        //now build the triTable using triTable
        for (int n = 0; triTable[cubeIndex][n] != -1; n+=3) {
            Triangle tmp;
            tmp.p[0] = intVerts[triTable[cubeIndex][n+2]];
            tmp.p[1] = intVerts[triTable[cubeIndex][n+1]];
            tmp.p[2] = intVerts[triTable[cubeIndex][n]];
            tmp.norm = QVector3D::crossProduct(tmp.p[1] - tmp.p[0], tmp.p[2] - tmp.p[0]);
            tmp.norm.normalize();
            TriangleForMPI local_triangle_mpi;
            local_triangle_mpi.p1_x = tmp.p[0].x();
            local_triangle_mpi.p1_y = tmp.p[0].y();
            local_triangle_mpi.p1_z = tmp.p[0].z();
            numTriangles++;
        }
    }
    MPI_Request request;
    MPI_Isend(&numTriangles, 1, MPI_INT, MASTER_ID, 0, MPI_COMM_WORLD, &request);
    MPI_Isend(triangle_mpi.data(), numTriangles, ptype, MASTER_ID, 1, MPI_COMM_WORLD, &request);
    if(id == MASTER_ID)

```

Рис. 2. Реалізація розподіленого підходу алгоритму «маршируючих кубів»

Після того як усі розділи оброблено, локальний вихід потрібно об'єднати з глобальним. Для зручності обрано простий, але ефективний спосіб. Коли кожен потік завершує заповнення локального виводу, цей вивід додається до глобальних точок, нормалей і трикутників, де дозволено додавати до глобального виводу лише по одному потоку за раз (рис. 3).

```

std::vector<TriangleForMPI> global_triangle_mpi;
int global_numtriangle = 0;
global_triangle_mpi.resize(100000);
for(int i = 0; i < nb_procs; i++)
{
    int numtriangle = 0;
    MPI_Status status;
    MPI_Recv(&numtriangle, 1, MPI_INT, i, 0, MPI_COMM_WORLD, &status);
    global_numtriangle += numtriangle;
    TriangleForMPI* buffer;
    Triangle tmp;
    tmp.p[0].setX(buffer[s].p1_x); } }
global_triangle_mpi.clear();
global_triangle_mpi.shrink_to_fit();
MPI_Type_free(&ptype);
MPI_Finalize();

```

Рис. 3. Триангуляція розподіленого підходу за допомогою MPI

Цей алгоритм не розроблений для явної мети паралелізму, у ньому є кілька недоліків, які перешкоджають масштабованості.

В алгоритмі кінцевий розмір не визначено заздалегідь, тому вихідні дані, сформовані паралельно, мають бути об'єднані, що спричиняє паралельне вузьке місце та створює повторювані точки. Крім того, вихідні масиви не можуть бути правильно розподілені, тому знадобився динамічний розподіл пам'яті.

Проаналізувавши прискорення роботи алгоритму «маршируючих кубів» за допомогою MPI з різними потоками на кожному вузлі видно, що лінія показує прискорення за часом у секундах (рис. 4).

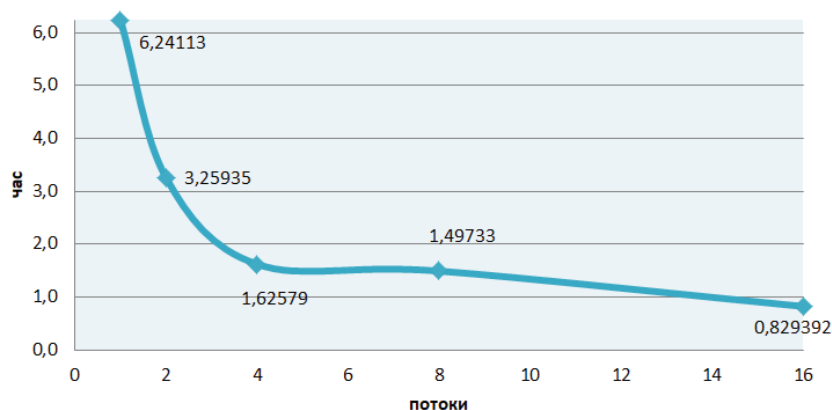


Рис. 4. Порівняння роботи MPI зі зміною в потоках

Очевидно, що код MPI масштабується краще, в обчислювальному кластері на ОС Linux не нижче за версії 20.0 і з використанням однакових параметрів серверу, ніж у кластері, де продуктивність обчислювальних машин різна. Тести MPI проводилися на декількох вузлах. Оскільки кожен код працює над окремими розділами загального зображення паралельно однаково, очікується, що результати продуктивності будуть подібними. Для проведення дослідження використовувався обчислювальний кластер, який складався з двох серверів Intel (R) Core(TM) i7-4770 CPU @ 3.40GHz 8 ядер і візуалізація геометричної моделі з розбиттям 240 (рис. 5).



Рис. 5. Побудова геометричної моделі в середовищі QT Creator

Після читання даних зображення код MPI копіює дані розділу зображення в кожен процесор. Це швидка операція на одному обчислювальному вузлі, яка пізніше може мати додаткові переваги.

### Висновки

Отже, представлено паралельний алгоритм побудови геометричних об'єктів за допомогою функціонального підходу в розподіленій системі, ефективність якого перевершує класичний алгоритм у часі. Скалярне поле розбивається на кілька частин, застосовується для кожної частини в різних процесах за допомогою MPI. Нитки виконання під час роботи MPI – довготривалі процеси (на відміну від динамічно породжених потоків), є симетричними за своїми можливостями й виконанням. Недостатнє усвідомлення симетрії процесів MPI може спричинити до неефективних і немасштабованих рішень. Експеримент показує, що на ефективність також впливає обрана архітектура та продуктивність комп'ютерної системи.

### Список використаної літератури

1. Incorporating long messages into the LogP model – one step closer towards a realistic model for parallel computation / A. Alexandrov et al. USA : Tech. Rep, 1995. P. 206.
2. Flexible collective communication tuning architecture applied to Open MPI, PVM/MPI / G.E. Fagg et al. USA : Manning Publications, 2006. P. 14.
3. Constructing a prior-dependent graph for data clustering and dimension reduction in the edge of AIoT, Future Gener / T. Guo et al. Comput. Syst. 128. Kobe, 2022. P. 381.
4. Predicting MPI collective communication performance using machine learning, in: 2020 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER) / S. Hunold et al. Kobe, 2020. P. 259.
5. On construction of sensors, edge, and cloud (iSEC) framework for smart system integration and applications / E. Kristiani et al. *IEEE Int. Things J.* 2020. № 8(1). P. 309.
6. Rico-Gallego J., Lastovetsky A.L., Martín J.C.D. Model-based estimation of the communication cost of hybrid data-parallel applications on heterogeneous clusters. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2017. № 28(11). P. 217.

### References

1. Alexandrov, A., Ionescu, M.F., Schauer, K. E. & Scheiman, C. (1995) Incorporating long messages into the LogP model – one step closer towards a realistic model for parallel computation, USA: Tech. Rep.

2. Fagg, G.E., Pjesivac-Grbovic, J., Bosilca, G., Angskun, T., Dongarra, J. & Jeannot, E. (2006) Flexible collective communication tuning architecture applied to Open MPI, PVM/MPI. USA : Manning Publications.
3. Guo, T., Yu, K., Aloqaily, M. & Wan, S. (2022) Constructing a prior-dependent graph for data clustering and dimension reduction in the edge of AIoT, *Future Gener. Comput. Syst.* 128, Kobe.
4. Hunold, S., Bhatele, A., Bosilca, G. & Knees, P. (2020) Predicting MPI collective communication performance using machine learning, in: 2020 IEEE International Conference on Cluster Computing (CLUSTER), Kobe.
5. Kristiani, E., Yang, C.-T., Huang, C.-Y., Ko, P.-C. & Fathoni, H. (2020) On construction of sensors, edge, and cloud (iSEC) framework for smart system integration and applications, *IEEE Int. Things J.* Vol. 8(1). USA.
6. Rico-Gallego, J., Lastovetsky, A.L. & Martín, J.C.D. (2017) Model-based estimation of the communication cost of hybrid data-parallel applications on heterogeneous clusters. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* Vol. 28(11). USA.

Калюжняк Анастасія Вікторівна – аспірантка кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету, e-mail: anastasia.korgun@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4837-7566.

Kaliuzhniak Anastasiia Victorivna – Postgraduate Student at the Department of Software Engineering of the Zaporizhzhia National University, e-mail: anastasia.korgun@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4837-7566.



В.А. КЮСАК, В.Ф. ІСАЄВ, С.С. ПАЛЬЧИК  
Одеська державна академія будівництва та архітектури

## ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРУБОПРОВОДУ ПІСЛЯ АВАРІЙНОГО РЕМОНТУ

*Статистика показує, що кількість аварій на трубопроводах має тенденцію до зростання. Відмови викликані в основному корозійним зносом і старінням трубопроводів, недосконаліми конструктивними рішеннями, виробничими дефектами труб, дефектами будівельно-монтажних і ремонтних робіт, виною обслуговуючого персоналу й іншими причинами. Різноманітні дефекти на стінках трубопроводу, згруповані або суцільні корозійні виразки знижують несучу здатність трубопроводу й можуть призвести до поломок. Аварії з розривом трубопроводу трапляються відносно рідко, але навіть незначний розрив може завдати величезної шкоди через забруднення навколишнього середовища, можливі вибухи та пожежі, загибель людей і порушення поставок нафти, газу й нафтопродуктів споживачам. Таким чином, підтримка цілісності лінійної частини трубопроводів є однією з головних проблем трубопровідного транспорту. Часто трубопроводи, особливо промислові, мають перфораційні розломи. Тому швидке та якісне усунення цих пошкоджень має велике значення.*

*Аварії внутрішньопромислових трубопроводів часто супроводжуються великими втратами нафти й забрудненням навколишнього середовища. Тому проблема аварійного ремонту нафтопромислових трубопроводів є дуже важливою та актуальною. Найбільш простим і поширеним способом усунення аварійних ситуацій на діючих трубопроводах є застосування різного роду накладних елементів і сталевих заглушок.*

*Наявні методи прогнозування ресурсу трубопроводу з урахуванням циклічного навантаження базуються на відомому рівнянні малоциклової втоми Коффіна-Менсона. При цьому початковими основними параметрами є амплітуда деформації  $\epsilon$  та відносне звуження  $\psi$ . Такий підхід доцільний для обмежених типів елементів конструкції, для яких можна визначити локальні (у місці дефекту) значення  $\epsilon$  та  $\psi$ . Оцінювання локального значення  $\epsilon$  для конструктивних елементів трубопроводів є проблематичним хоча б тому, що радіуси більшості вершин дефектів практично не можуть бути визначені. У роботі запропоновано метод оцінювання малоциклової втоми довговічності пошкоджених труб після аварійного ремонту.*

*Ключові слова: аварійний ремонт, ресурс трубопроводу, рівняння Коффіна-Менсона.*

V.A. KIOSAK, V.F. ISAIEV, S.S. PALCHYK  
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

## FORECASTING THE DURATION OF OPERATION OF THE PIPELINE AFTER AN EMERGENCY REPAIR

*Statistics show that the number of accidents at pipelines tends to grow. The failures are caused mainly by corrosion deterioration and ageing of pipelines, imperfect design solutions, manufacturing defects in pipes, defects in construction-assembly and repair works, fault of operating personnel and other reasons. Various defects on the pipeline walls, grouped or continuous corrosion sores reduce the pipeline's load-bearing capacity and can lead to failures. Pipeline rupture accidents are relatively rare, but even a minor rupture can cause enormous damage due to environmental contamination, possible explosions and fires, loss of life and the disruption of oil, gas and petroleum product supplies to customers. Maintaining the integrity of the linear part of pipelines is therefore one of the main challenges in pipeline transport. Often pipelines, especially industrial pipelines, develop perforating faults. Therefore, prompt and qualitative elimination of these damages is of great importance.*

*The breakdowns of in-field pipelines are often accompanied by big losses of oil and pollution of the environment. Therefore, the problem of emergency repair of oil-field pipelines is very important and urgent. The most simple and widespread way to eliminate emergency situations at operating pipelines is to apply different kinds of overlaying elements and steel plugs.*

*The existing methods for prognosis of pipeline life taking into account cyclic loading are based on the known Coffin-Manson low-cycle damage equation. In this case the initial basic parameters are amplitude of deformation  $\epsilon$  and relative contraction  $\psi$ . From our point of view, such approach is expedient for limited types of structural elements, for which it is possible to determine local (in the defect place) values of  $\epsilon$  and  $\psi$ . The estimation of local value  $\epsilon$  for structural elements of pipelines is problematic if only because radii of most defect tops practically cannot be determined. In the paper a method of evaluation of low cycle fatigue life of damaged pipes after emergency repair is proposed.*

*Key words: emergency repair, pipeline life taking, Coffin-Manson equation.*

### Постановка проблеми

Використання трубопроводів для транспортування великої кількості природного газу для промислових і комерційних цілей і побутових споживачів є надійним способом транспортування енергії. Надійність трубопровідного транспорту визначає неперервність роботи підприємств. Незважаючи на зростаючі вимоги до будівництва й експлуатації промислових трубопроводів, аварії на діючих газопроводах трапляються з різних причин (недоліки будівельно-монтажних робіт, брак виробництва труб і трубопровідної арматури, корозія, природні явища, порушення правил експлуатації тощо) і їх ліквідація пов'язана з тимчасовою зупинкою газопроводів.

Тому збереження працездатності лінійної частини трубопроводів є однією з основних проблем трубопровідного транспорту. Велике значення має оперативне та якісне усунення пошкоджень, що виникли, так як аварії та аварійні зупинки супроводжуються значними економічними втратами й забрудненням довкілля.

Найбільш простим і поширеним методом усунення аварійних ситуацій на діючих трубопроводах є застосування різного роду накладних елементів. Сучасні технології застосування ремонтних накладних елементів знижують ресурс безпечної експлуатації трубопроводів, а деякі з них застосовуються як тимчасові. Наявні методи прогнозування ресурсу трубопроводів з урахуванням циклічного навантаження базуються на відомих рівняннях малоциклової втоми Коффіна-Мэнсона.

Рівняння малоциклової втоми Коффіна-Мэнсона є базовою основою для наявних методів прогнозування ресурсу трубопроводів з урахуванням циклічного навантаження. Це рівняння пов'язує вихідні базові параметри – амплітуду деформацій  $\epsilon$  та відносне звуження  $\psi$ . З погляду можливості визначення практично оцінювання локального значення  $\epsilon$  для конструктивних елементів трубопроводу проблематичним через труднощі знаходження радіуса закруглення більшої вершин дефектів. Тому такий метод є доцільним для таких конструктивних елементів, для яких ми можемо визначити в місці дефекту локальні значення  $\psi$  і  $\epsilon$ .

Під час дослідження ресурсу трубопроводу після аварійного ремонту з використанням накладних елементів такі виміри зробити важко. Ці складності призводять до того, що регламентовані методи розрахунку малоциклової довговічності трубопроводів в основному варто зараховувати до категорії теоретичних принаймні для об'єктів трубопровідного транспорту.

Сказане визначає необхідність пошуку інших підходів до оцінювання довговічності трубопроводів. Тому завдання розроблення методики оцінювання малоциклової довговічності труб із пошкодженнями, які аварійно відремонтовані із застосуванням накладних елементів, і її застосування для прогнозування строку служби газопровідних труб, що розглядається в роботі, є актуальним.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Різноманітні причини й типи відмов, що викликані корозією, були предметом дослідження великої групи вчених і широко відображені в науковій літературі. Корозійний вплив містить значну загрозу для систем трубопроводів, яка може привести до втрат герметичності. Різні типи підходів до аналізу причин корозії вивчені в роботі [1] для механічних систем. Отримані ними дані використовували для прогнозування аварій. Різні типи оцінок аварійних ситуацій застосовували з урахуванням їх особливостей для різного роду пошкоджень. Запропоновано декілька наукових методів задля контролю появи тріщин під впливом навколишнього середовища з критеріями оцінювання строку служби залежно від умов експлуатації [2].

Розрахунки на міцність елементів конструкцій, що перебувають під дією довготривалих циклічних навантажень, подано в роботі [3], де припускали бездефектність матеріалів і втомне руйнування в класичному розумінні цього явища. Також відомі експериментальні дослідження, за результатами яких учені будували граничні діаграми циклічної міцності елементів конструкцій із тріщинами, тобто їх залишкової циклічної міцності [4].

У дослідженнях [5] розроблена автоматична система оцінювання аварійних ситуацій на трубопроводах, яка дає можливість оператору в режимі реального часу приймати необхідні рішення. Можливості системи оцінювання аварійних ситуацій можуть бути модернізовані у звичайних системах шляхом отримання даних за допомогою спектрального аналізу та спеціальних приборів. У праці [6] дослідники описали різні причини витончення стінок труб, а також розробили методи їх ремонту й прогнозування швидкості витончення стінки на основі даних вимірювання. У результаті кропіткої праці вчені з різних країн зуміли узагальнити й об'єднати різні методи прогнозування ресурсу для різних видів труб, які використовуються в газопровідних системах. Модель для оцінювання технічного стану трубопровідних систем підводного залягання запропонована в роботі [7].

Я. Сікорська, М. Ходкевич, Л. Ма в статті розглянули можливості використання для інженерних завдань бізнес моделі трирівневого процесу. Запропонований метод дає змогу обрати підходу модель для опису трирівневої моделі аварійної ситуації [8]. У роботі [9] запропоновано новий підхід прогнозування пластичного руйнування труб із використанням методу скінченних елементів для 24-дюймової труби. Побудова моделей, основаних на статистичних даних для оцінювання аварійних ситуацій, запропонована в статті [10]. Проста модель зростання тріщин під час прогнозування аварійних ситуацій у газотранспортній системі з використанням байєсівської мережі й методу скінченних елементів використана в праці [11].

В Україні вагомий науковий внесок у вирішення цього питання зробили такі вчені, як А. Айбиндер, П. Бородавкін, А. Коршак, В. Курочкін, Н. Малюшин, В. Грудз, Д. Тимків, Л. Шлапак, В. Івасів, Є. Крижанівський, Б. Білобран. Варто відзначити, що в наукових працях [12; 13] досліджено вплив режимних параметрів роботи неізотермічного газопроводу на його пропускну здатність, розглянуто проблеми прогнозування довговічності трубопроводів з урахуванням малоциклових навантажень. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона розроблено метод уварювання в ділянку трубопроводу з одношарових труб багатошарових вставок. У разі руйнування цієї ділянки внутрішнім тиском цей метод дає змогу зупинити лавинний процес поширення тріщини в багатошарових вставках.

На основі ймовірнісних методів в Україні розроблено галузевий стандарт прогнозування технічного стану механічних систем, який допускає застосування й для труб [14].

Сьогодні проведено численні нові дослідження дефектів труб і прогнозів аварійних ситуацій газопроводів на основі статистичних даних за допомогою сучасних методів з урахуванням різних факторів. Але питання експлуатаційної надійності й довговічності роботи газопроводів є досить значимим і важливим, тому потребує подальшого детального та поглибленого вивчення з використанням нових наукових досягнень.

### Мета дослідження

На діючих магістральних трубопроводах процес корозійного розтріскування під напруженням розтягнутий у часі на десятки років. Сьогодні, коли внутрішній тиск і діаметр труб зростає, цей процес «молодшає», викликаючи руйнування після 20 й менше років роботи труби.

Щоб процес формування тріщини міг відбутися, необхідна одночасна наявність таких факторів:

- дія циклічних напружень достатньої кількості;
- корозійно-активне середовище;
- матеріал, який неспроможний до опору корозії (трубні сталі належать до таких матеріалів).

Процес виникнення й розвитку тріщини можна поділити на три етапи: ініціювання, розповсюдження (стабільне повільне і швидке катастрофічне) та зупинка. На кожному з етапів після виявлення ділянки руйнування вони підлягають ремонту. Одним із основних методів ремонту є застосування накладних елементів (ремонтних гільз, хомутів, латок тощо) і сталевих заглушок. Такий ремонт вважають тимчасовим.

**Мета дослідження полягає в такому:**

- аналізі умов експлуатації магістральних трубопроводів і встановлення основних причин їх руйнування;
- вивченні ефективності ремонтів за допомогою накладних елементів;
- наведенні прикладу з підрахунком кількості циклів навантаження, які пройдуть до руйнування аварійної ділянки після ремонту із застосуванням накладних елементів.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

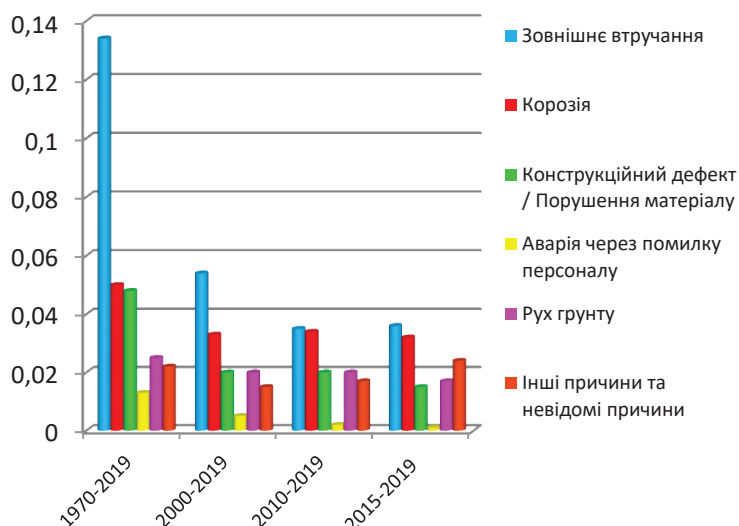
Газотранспортна система України знаходиться в експлуатації в середньому від 30 до 52 років залежно від терміну введення в дію її складників. За час експлуатації значна частина магістральних газопроводів і технологічного обладнання вичерпала свій ресурс, неодноразово підлягала поточному та капітальному ремонтам і застаріла морально.

Указані терміни експлуатації газопроводів та об’єктів газотранспортної системи вимагають вкладення значних коштів для підвищення надійності й підтримки їх у технічному справному стані, виконання технологічних регламентів з перекачування газу. Зменшення об’ємів прокачки газу через газотранспортну систему, нерівномірність навантаження стає ще одним джерелом для підвищення аварійності трубопроводів.

У світі для обліку аварій на трубопроводах існують різні організації. Мета цих організацій реєстрація, систематизація та аналіз причин несправностей у газопроводах.

У 1982 році шість європейських операторів газотранспортних систем виступили з ініціативою збору даних про ненавмисні викиди газу із систем транспортних трубопроводів. Ця співпраця офіційно оформлена шляхом створення EGIG (Європейська група даних про аварії на газопроводах).

Мета цієї ініціативи полягала в тому, щоб забезпечити широку основу для розрахунків показників безпеки трубопровідних систем у Європі, таким чином забезпечуючи достовірну картину кількості, частоти й характеру інцидентів. Сьогодні EGIG об’єднує сімнадцять операторів газотранспортних систем Європи та має велику, зібрану з 1970 року базу даних про інциденти на газопроводах. Згідно зі звітом EGIG, причини аварій на європейських газопроводах розподілені так (рис. 1).



**Рис. 1. Причини первинних відмов на європейських газопроводах (згідно зі звітом EGIG [15])**

Рис. 1 демонструє частоту відмов за причиною інциденту. Хоча частота відмов зменшилася з роками, загальна тенденція розподілу витоків за причинами залишилися незмінними: в основному були аварії, які викликані зовнішнім втручанням.

З діаграми видно, що ще одна з механічних поломок, що зустрічаються найчастіше в різних газових трубопроводах, викликана корозією обладнання й систем.

Рис. 2 показує, що корозія в більшості випадків призвела до витoku з малих отворів або тріщин. Помічена дуже мала кількість отворів і лише один розрив трубопроводу. Цей розрив на трубопроводі, побудованому до 1954 року, викликаний внутрішньою корозією трубопроводу, який спочатку використовувався для транспортування коксового газу й не є репрезентативним для звичайних випадків корозії.

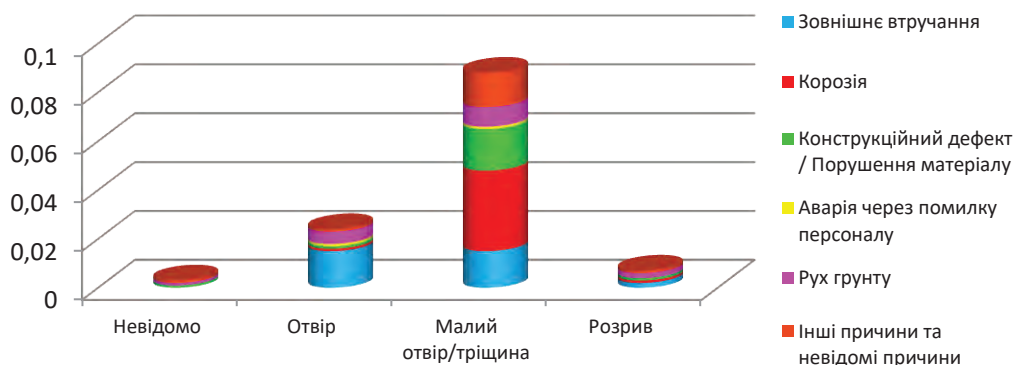


Рис. 2. Первинна частота несправностей, причина й розмір витoku (2010–2019) [15]

Для запобігання більшості відмовам у повсякденній роботі наземних і морських об'єктів розроблені та застосовуються численні внутрішні технічні вдосконалення. Методи й методології аварійних робіт постійно змінюються залежно від місцевих вимог з урахуванням наявного обладнання та персоналу для його використання. Незмінним залишається прагнення підвищення надійності ремонтів, забезпечення гарантійного строку експлуатації з одночасним зниженням собівартості ремонтних робіт.

Розглянемо закономірності багатоциклової та малоциклової втоми металу стосовно трубних сталей з урахуванням особливостей напруженого стану металу конструктивних елементів трубопроводів.

Під втомою металу розумітимемо ступінь пошкоджуваності структури металу за багаторазової дії напруг. Напруги можуть бути нормальними, дотичними або еквівалентними. Необхідно враховувати, що граничні напруги, що багаторазово прикладаються, для найбільш поширених вуглецевих і низьколегованих сталей у кілька разів менші за руйнівні напруги за одноразового навантаження.

Більшість запропонованих рівнянь малоциклової втоми пов'язують число циклів до руйнування  $N$ , амплітуду пластичних деформацій  $\varepsilon_{nl}$ , граничну деформацію  $\varepsilon_{np}$ . Зокрема, такими є рівняння Орована:

$$N\varepsilon_{nl} = const ; \tag{1}$$

Коффіна-Менсона:

$$N^{m_u} \varepsilon_{nl} = C_u , \tag{2}$$

де  $m_u$  та  $C_u$  – константи.

Константа  $C_u$  пов'язана з граничною пластичністю металу:

$$C_u = \frac{1}{2} \varepsilon_{np} = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{1-\psi} \right), \tag{3}$$

де  $\psi$  – відносне звуження в разі розриву зразка.

Підставляючи в рівняння Коффіна-Менсона сумарну амплітуду деформацій  $\varepsilon = \varepsilon_{nl} + \varepsilon_y$ , де  $\varepsilon_y$  – амплітуду пружної деформації, рівняння довговічності записують у такому вигляді:

$$\varepsilon = \frac{1}{4} \frac{1}{m_u \sqrt{N}} \cdot \varepsilon_{np} + \frac{\sigma_{-l}}{E}, \quad (4)$$

де  $\sigma_{-l}$  – межа втоми.

Іноді це рівняння подають в умовних напругах:

$$\sigma_a^* = \varepsilon \cdot E = \frac{1}{4} \frac{1}{m_u \sqrt{N}} \cdot \varepsilon_{np} + \sigma_{-l}. \quad (5)$$

Показник ступеня  $m_u$  в цих формулах залежить від механічних характеристик металу. Сталі з високим показником  $m_u$  характеризуються нижчим відношенням тимчасового опору до межі плинності. Наприклад, із підвищенням  $\sigma_s$  з 700 до 1400 МПа коефіцієнт  $m_u$  змінюється від 0,50 до 0,65. Ця залежність апроксимується формулою:  $m_u = 0,5 + 0,0002 (\sigma_s - 700)$ . Зауважимо, що параметр  $m_u$  корелює з коефіцієнтом деформаційного зміцнення  $m$ . За  $m < 0,15$   $m_u = 0,2$ . За  $m > 0,15$  параметр  $m_u$  лінійно залежить від коефіцієнта деформаційного зміцнення:  $m_u = 0,2 + 2,4 (m - 0,125)$  [14].

Менсон на основі деформаційного та силового критеріїв запропонував більш загальне рівняння малоциклової втоми в амплітудах повної деформації:

$$\varepsilon_a = SN^{-s} + TN^t,$$

де  $S$ ,  $s$ ,  $T$  й  $t$  – константи матеріалу, причому для багатьох матеріалів:

$$s = 0,12; S = 3,5 \frac{\sigma_s}{E}; t = 0,6; T = \ln \frac{1}{1 - \psi}.$$

Довговічність елемента визначається інтегруванням рівняння

$$N_{mp} = \int_{h_0}^{h_{kp}} \frac{dh}{C_\sigma \cdot (\Delta K_{ie})^{n_\sigma}}, \quad (6)$$

де  $h_0$  та  $h_{kp}$  – вихідна та критична глибини тріщини.

Рівняння (6) можна подати в такому вигляді:

$$N_{mp} = N_0 \cdot K_n, \quad (7)$$

де  $K_n$  у першому наближенні дорівнює  $h_0/h_{kp}$ ,  $N_0$  визначається з рівняння (7) за початкового значення коефіцієнта інтенсивності деформацій  $N_{mp} K_{ie}^{(0)}$ :

$$N_0 = \frac{h_{kp} - h_0}{C_\sigma (K_{ie}^{(0)})^{n_\sigma}}. \quad (8)$$

З урахуванням  $K_n$  і  $N = t/v$  ця формула може бути представлена в такому вигляді:

$$t_p = \frac{\delta_0 \cdot \eta_0 (n_h - 1)}{v \cdot n_h \cdot C_\sigma (K_{ie}^{(0)})^{n_\sigma}}, \quad (9)$$

де  $t_p$  – час до руйнування елемента;  $\delta_0$  – товщина елемента;  $n_h = h_{kp}/h_0$ ;  $v$  – частота циклів навантаження.

Наведемо конкретний приклад розрахунків. Нехай конструктивний елемент працює за пульсуючого нульового циклу навантаження з максимальною напругою  $\sigma_{max}$ , що дорівнює робочому  $\sigma_p$ . У цьому робоча напруга становить  $\sigma_p = 0,67\sigma_s$ , тобто  $\sigma_p = 201$  МПа. Коефіцієнт деформаційного зміцнення  $m = 0,23$ , а відносне звуження  $\psi = 52\%$ .

При зазначених вихідних даних параметри циклічної тріщиностійкості дорівнюють  $n_\sigma = 1,23$  і  $C_\sigma = 1,116 \cdot 10^{-4}$ . За даними діагностики, початкова глибина тріщиноподібного дефекту  $h_0 = 3,8$  мм. Далі знаходимо критичну глибину дефекту, що відповідає робочий напрузі  $\sigma_p$ . Сталь 17ГС належить до категорії пластичних сталей, на яку параметр тріщиностійкості  $\alpha_{mp}$  [14]

дорівнює одиниці ( $\alpha_{mp} = 1,0$ ). Це говорить про те, що елемент (труба) з протяжним тріщиноподібним дефектом руйнуватиметься за таких тисків, за яких в ослабленому перерізі моделі виникають середні напруги, близькі за величиною до тимчасового опору металу  $\sigma_s$ . Іншими словами, міцність таких елементів пропорційно залежатиме від ступеня послаблення стінки:

$$\sigma_{нс} = \sigma_s^{0M} \left( 1 - \frac{h}{\delta_0} \right). \quad (10)$$

Підставляючи це рівняння, замість  $\sigma_{HB}$  значення робочої напруги  $\sigma_p$ , отримуємо  $h_{kp} = 9,8$  мм. У цьому відносна глибина дефекту дорівнює  $\eta_{kp} = 0,71$ , а початкове значення  $\eta_0 = 0,275$ .

Далі визначаємо коефіцієнт інтенсивності деформацій  $K_{ie}$ . При  $\eta_0 = 0,275$  за ГОСТ 25.506-85 знаходимо поправну функцію  $Y_s = 2,85$ . Тоді коефіцієнт інтенсивності деформацій дорівнюватиме:

$$K_i = 201\sqrt{0,0038} \cdot 2,85 \approx 35 \text{ МПа} \sqrt{M}. \quad (11)$$

При цьому коефіцієнт інтенсивності деформацій буде рівний:

$$K_{ie} = \left( \frac{35}{300} \right)^{\frac{2}{1+0,23}} \approx 0,0304. \quad (12)$$

Згідно зі знайденим значенням  $K_{ie}$ , за формулі (12) знайдемо  $N_{mp}$ :

$$N_{mp} = \frac{3,8}{9,8} \frac{(9,8 - 3,8) \cdot 10^{-3}}{1,116 \cdot 10^{-4} \cdot (0,0304)^{1,23}} \approx 1531 \text{ цикл.}$$

Це число циклів навантаження відповідає нульовому циклу навантаження:  $P_{min} = 0$ ;  $P_{max} = P_p$ , де  $P_p$  – робочий тиск ( $P_p = 3,35$  МПа). Зниження амплітуди коефіцієнта інтенсивності деформацій удвічі призводить до зростання довговічності майже у 2,5 рази. За частоти циклів навантаження  $\eta = 365$  циклів/рік час до руйнування  $t_p = 4,2$  року. Таким чином, проведено оцінювання параметрів кінетичного рівняння малоциклової тріщиностійкості й отримано формули для розрахунків ресурсу елементів з тріщиноподібними дефектами.

### Висновки

Проаналізовано умови експлуатації трубопроводів і встановлено, що основною причиною їх руйнування є втомні й корозійно-втомні пошкодження. Наявні сьогодні методи прогнозування довговічності трубопроводів вимагають удосконалення, оскільки не можуть повною мірою врахувати всі експлуатаційні фактори. Застосування системи комплексного моніторингу технічного стану магістральних зварних трубопроводів і своєчасний ремонт його частин забезпечать зниження рівня завчасного корозійного зносу вузлів, збільшення міжремонтного строку технологічного обладнання й підвищення рівня його безпечної експлуатації.

У статті шукали відповідь на питання, наскільки вдалим є застосування накладних елементів під час ремонту трубопроводу. На конкретному прикладі продемонстровано алгоритм визначення залишкового ресурсу трубопроводу після ремонту.

Таким чином, у статті вирішена актуальне науково-технічне завдання за методом, який використовував рівняння Коффіна-Менсона, доведена дієвість ремонту дефектів газопроводів за допомогою накладних елементів, встановлено, що кількість циклів, які пройдуть до руйнування дефектної ділянки трубопроводу, може становити декілька років.

### Список використаної літератури

1. Varde P.V., Pecht M.G., Life Prediction. *Risk-Based Eng. An Integr. Approach to Complex Syst. Ref. to Nucl. Plants*. Singapore : Springer Singapore. 2011. P. 115–139.
2. Artificial neural network models for predicting condition of offshore oil and gas pipelines / M.S. El-Abbasy et al. *Autom Constr.* 2014. № 45. P. 50–65. doi: 10.1016/j.autcon.2014.05.003

3. Prediction Method for Plastic Collapse of Pipes Subjected to Combined Bending and Torsion Moments / Y. Li et al. *J Press Vessel Technol.* 2010. P. 81–87. doi: 10.1115/PVP2010-25101
4. Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches / X-S. Si et al. *Eur J Oper Res.* 2011. Vol. 213. P. 1–14. doi: 10.1016/j.ejor.2010.11.018
5. Mahmoodian M., Aryai V. Structural failure assessment of buried steel water pipes subject to corrosive environment. *Urban Water J.* 2017. № 14. P. 1023–1030. doi: 10.1080/1573062X.2017.1325500
6. Rezaei H., Ryan B., Stoianov I. Pipe Failure Analysis and Impact of Dynamic Hydraulic Conditions in Water Supply Networks. *Procedia Eng.* 2015. Vol. 119. P. 253–262. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.883
7. Pipe Failure Prediction in Water Distribution Systems Considering Static and Dynamic Factors / R. Farmani et al. *Procedia Eng.* 2017. Vol. 186. P. 117–126. doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.217
8. Sikorska J.Z., Hodkiewicz M., Ma L. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. *Mech Syst Signal Process.* 2011. Vol. 25. P. 1803–1836. doi: 10.1016/j.ymsp.2010.11.018
9. Lahmadi L.S., Terrissa N., Zerhouni A. Data-driven method for estimating the remaining useful life of a Composite Drill Pipe. *IEEE.* 2018.
10. Remaining useful life prediction of water pipes using artificial neural network and adaptive neuro fuzzy inference system models / R. Tavakoli et al. Texas : UTA Libraries, 2018.
11. Remaining useful life estimation of structure systems under the influence of multiple causes: Subsea pipelines as a case study / B.B. Cai et al. *IEEE Trans Ind Electron.* 2020. Vol. 67. P. 5737–5747. doi: 10.1109/TIE.2019.2931491
12. Calculation of Lifetime of Steel Oil Pipelines with the Account of Corrosive Environment Affect / O. Stepova et al. *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations. ICBI 2019. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer.* 2020. Vol. 73. doi: 10.1007/978-3-030-42939-3\_71
13. Середюк М.Д., Якімов Й.В., Лісафін В.П. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів. Івано-Франківськ : ІФНТУОГ, 2001. 517 с.
14. Національний стандарт України. Надійність техніки. Оцінювання і прогнозування залишкового ресурсу (терміну служби) технічних систем ДСТУ. Видання офіційне. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 69 с.
15. Gas pipeline incidents, 11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970–2019). URL: <http://egig.eu/report>

#### References

1. Varde, P.V. & Pecht, M.G. (2014). Life Prediction. *Risk-Based Eng. An Integr. Approach to Complex Syst. Ref. to Nucl. Plants.* Singapore : Springer Singapore. P. 115–39.
2. El-Abbasy, M., Senouci, A., Zayed, T., Mirahadi, F. & Parvizsedghy, L. (2014). Artificial neural network models for predicting condition of offshore oil and gas pipelines. *Autom Constr.* Vol. 45. P. 50–65. doi: 10.1016/j.autcon.2014.05.003
3. Li, Y., Hasegawa, K., Hoang, P. & Bezensek, B. (2010). Prediction Method for Plastic Collapse of Pipes Subjected to Combined Bending and Torsion Moments. *J Press Vessel Technol.* P. 81–87. doi: 10.1115/PVP2010-25101
4. Si, X.-S., Wang, W., Hu, C.-H. & Zhou, D.-H. (2011). Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches. *Eur J Oper Res.* Vol. 213. P. 1–14. doi: 10.1016/j.ejor.2010.11.018
5. Mahmoodian, M. & Aryai, V. (2017). Structural failure assessment of buried steel water pipes subject to corrosive environment. *Urban Water J.* Vol. 14. P. 1023–1030. doi: 10.1080/1573062X.2017.1325500



6. Rezaei, H., Ryan, B. & Stoianov, I. (2015). Pipe Failure Analysis and Impact of Dynamic Hydraulic Conditions in Water Supply Networks. *Procedia Eng.* Vol. 119. P. 253–262. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.883
7. Farmani, R., Kakoudakis, K., Behzadian, K. & Butler, D. (2017). Pipe Failure Prediction in Water Distribution Systems Considering Static and Dynamic Factors. *Procedia Eng.* Vol. 186. P. 117–126. doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.217
8. Sikorska, J.Z., Hodkiewicz, M. & Ma, L. (2011). Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. *Mech Syst Signal Process.* Vol. 25. P. 1803–1836. doi: 10.1016/j.ymsp.2010.11.018
9. Lahmadi, L., Terrissa, N. & Zerhouni, A. (2018). Data-driven method for estimating the remaining useful life of a composite drill pipe. *International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC ASET). IEEE.* P. 192–195.
10. Tavakoli, R. et al. (2018). Remaining useful life prediction of water pipes using artificial neural network and adaptive neuro fuzzy inference system models. Texas : UTA Libraries, 169 p.
11. Cai, B., Shao, X., Liu, Y., Kong, X., Wang, H., Xu, H. et al. (2020). Remaining useful life estimation of structure systems under the influence of multiple causes: Subsea pipelines as a case study. *IEEE Trans Ind Electron.* Vol. 67. P. 5737–5747. doi: 10.1109/TIE.2019.2931491
12. Stepova, O., Rassoha, I., Blazhko L. & Hanoshenko, O. (2020). Calculation of Lifetime of Steel Oil Pipelines with the Account of Corrosive Environment Affect. *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations. ICBI 2019. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer.* Vol. 73. P. 721–727. doi: 10.1007/978-3-030-42939-3\_71
13. Serediuk, M., Yakymiv, J. & Lisafin, V. (2002). Truboprovodnyi transport nafty i naftoproduktiv – [Pipeline transport of oil and oil products]. Ivano-Frankivsk : IFNTUOG. 517 p. [in Ukrainian]
14. National standard of Ukraine. Nadiinist tekhniky. Otsiniuvannia i prohnozuvannia zalyshkovoho resursu (terminu sluzhby) tekhnichnykh system DSTU – [Evaluation and prediction reserve resource (service term) technical systems]. (2015). DSTU. UkrNDNC, Kyiv, 69 p. [in Ukrainian]
15. Gas pipeline incidents, 11th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group (period 1970–2019). URL: <http://egig.eu/report>

Кіосак Володимир Анатолійович – к.ф.-м.н., професор кафедри вищої математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, e-mail: [kiosakv@ukr.net](mailto:kiosakv@ukr.net), ORCID: 0000-0002-7433-6709.

Ісаєв Володимир Федорович – к.т.н., доцент, директор Інституту гідротехнічного будівництва та цивільної інженерії Одеської державної академії будівництва та архітектури, e-mail: [isaevv5@gmail.com](mailto:isaevv5@gmail.com), ORCID: 0000-0002-9947-7284.

Пальчик Сергій Сергійович – аспірант кафедри вищої математики Одеської державної академії будівництва та архітектури, e-mail: [spalchyk@ukr.net](mailto:spalchyk@ukr.net), ORCID: 0009-0000-0425-4719.

Kiosak Volodymyr Anatoliiovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Higher Mathematics of the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, e-mail: [kiosakv@ukr.net](mailto:kiosakv@ukr.net), ORCID: 0000-0002-7433-6709.

Isaiev Volodymyr Fedorovych – PhD, Associate Professor, Director of the Institute of Hydraulic Engineering and Civil Engineering of the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, email: [isaevv5@gmail.com](mailto:isaevv5@gmail.com), ORCID: 0000-0002-9947-7284.

Palchyk Serhii Serhiiiovych – PhD Student at the Department of Higher Mathematics of the Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, e-mail: [spalchyk@ukr.net](mailto:spalchyk@ukr.net), ORCID: 0009-0000-0425-4719.

УДК 658.5.015.23:681.5.015.24

V.O. KONDRATETS, A.M. MATSUI, O.M. SERBUL, M.O. FEDOTOVA  
 Центральноукраїнський національний технічний університет

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄМУ ЗАХОПЛЕНОЇ ДОЗИ ПУЛЬПИ ЗАВИТКОМ ЖИВИЛЬНИКА В РАЗІ ПОВОРОТУ СИСТЕМИ КООРДИНАТ

*На збагачувальних фабриках України в перших стадіях рудопідготовки продуктивність подрібнення руди може знано зменшуватися внаслідок пульсації матеріалу в барабані кульового млина під час завантаження руди, пісків спірального класифікатора, води й куль. У процесі аналізу останніх досліджень і публікацій встановлено, що практично знайдено рішення запобігання виникненню пульсації під час завантаження в млин вихідної руди, води й куль. Однак цього не можна сказати щодо завантаження пісків спірального класифікатора. З огляду на те що стаття спрямована на розв'язання проблеми завантаження в кульовий млин пісків механічного спірального класифікатора, її тема є актуальною. Дослідження виконані в межах розроблення наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету. Метою роботи є встановлення можливості налаштування завиткового живильника на процес захоплення доз пульпи в приймальному пристрої поворотом системи координат завитка. У процесі дослідження використано методи порівняння, аналізу, теорії кульових млинів, теорії подрібнення матеріалів, теорії автоматичного керування, математичного моделювання, аналітичної геометрії, теорії плоских кривих, теорії визначених інтегралів. Доведено, що пісковий потік може сильно впливати на стан пульпи в кульовому млині. Завитковий живильник, поділяючи розвантаження спірального класифікатора, може полегшити ситуацію, однак він сам є джерелом збудження можливих коливань пульпи в кульовому млині. У процесі дослідження визначали поздовжні площі захопленої дози пульпи в старій і новій (поверненій на кут  $\varphi$ ) системі координат, які, відповідно, дорівнюють 0,002059 ум. кв. од. і 0,001449 ум. кв. од. Оскільки поздовжня площа повністю характеризує захоплену дозу пульпи, то судження можна робити за отриманими даними. З окремих даних видно, що об'єм захопленої дози під час повороту системи координат на кут  $10^\circ$  значно менший порівняно з показником без повороту. Зменшення об'єму захопленої дози завитком під час повороту системи координат становить 29,63%, що суттєво. Це негативно вплине на продуктивність живильника і призведе до перевитрати електроенергії на транспортування пульпи. Отже, у процесі проведених досліджень встановлено, що налагодження завиткових живильників недоцільно здійснювати поворотом системи координат. Необхідно розробити оригінальний підхід формування профілю завитка й фази встановлення його початку для забезпечення оптимальних параметрів завиткового живильника. Перспективою подальших досліджень є розроблення такого підходу формування профілю завитка й обґрунтування його встановлення стосовно завантажувальної горловини млина.*

*Ключові слова: завитковий живильник млина, профіль, налаштування, математичне моделювання, захоплена доза, поворот системи координат.*

V.O. KONDRATETS, A.M. MATSUI, O.M. SERBUL, M.O. FEDOTOVA  
 Central Ukrainian National Technical University

## MATHEMATICAL MODELLING OF THE VOLUME OF THE CAPTURED SLURRY DOSE BY THE FEEDER CURL WHEN THE COORDINATE SYSTEM IS ROTATED

*At concentrators in Ukraine in the first stages of ore preparation ore grinding capacity can be significantly reduced due to pulsations of material in the drum of the ball mill during the loading of ore, sands of the spiral classifier, water and balls. In the process of analysing recent studies and publications, it was found that practically solutions have been found to prevent the occurrence of pulsations during the loading of feed ore, water and balls into the mill. However, the same cannot be said for the loading of spiral classifier sands. Given that the article is focused on solving the problem of loading the sands of a mechanical spiral classifier into a ball mill, its topic is relevant. This research was carried out within the framework of the development of scientific topics of the Central Ukrainian National Technical University. The purpose of the work is to establish the possibility of adjusting the snail feeder to the process of capturing pulp doses in the receiving device by rotating the curl coordinate system. The methods of comparison, analysis, theory of ball mills, theory of grinding materials, theory of automatic control, mathematical modelling, analytical geometry, theory of plane curves, theory of definite integrals were used in the research process. It has been proven that sand flow can strongly influence the condition of the pulp in the ball mill. The snail feeder, dividing the discharge of the spiral classifier can alleviate the situation, but it is itself a source of excitation of possible pulp oscillations in the ball mill. In the process of the study the longitudinal areas of the captured pulp dose in the old coordinate system and in the new (rotated by the angle  $\varphi$ ) coordinate system were determined, which are respectively equal to 0.002059 conditional square unit*

and 0.001449 conditional square unit. Since the longitudinal area fully characterises the captured pulp dose, judgements can be made on the basis of the data obtained. The individual data show that the volume of the captured dose when the coordinate system is rotated by  $10^\circ$  is significantly less compared to that without rotation. The reduction in the volume of captured dose by the curl when the coordinate system is rotated is 29.63%, which is significant. This will negatively affect the feeder performance and lead to overconsumption of electricity for pulp transport. So, in the process of the conducted researches it has been established that it is inexpedient to adjust the snail feeders by rotation of the coordinate system. It is necessary to develop an original approach of curl profile formation and the phase of its beginning establishment to ensure optimal parameters of the snail feeder. The prospect of further research is the development of such an approach of curl profile formation and justification of its installation relative to the mill feed throat.

*Key words:* snail mill feeder, profile, setting, mathematical modelling, captured dose, coordinate system rotation.

### Постановка проблеми

Україна виробляє значну частку світового обсягу залізорудної сировини для чорної металургії. Унаслідок неухильного зменшення запасів багатих залізних руд із другої половини минулого століття все більша частка залізорудної сировини виробляється з бідних залізних руд шляхом їх збагачення в основному на магнітозбагачувальних фабриках. Такі технологічні процеси потребують тонкого подрібнення вихідної руди до розкриття краплин корисного компоненту, що потребує витрати величезної кількості електроенергії, куль і футерівки. Особливо це стосується першої стадії подрібнення вихідної руди безпосередньо на збагачувальній фабриці, де технологічний процес відбувається в кульових млинах, що працюють у замкненому циклі з механічними односпіральними класифікаторами. Унаслідок шкідливої дії різних факторів на вітчизняних збагачувальних фабриках допускається перевитрачання електричної енергії, куль і футерівки в процесах подрібнення руди, що збільшує собівартість однієї тонни готового залізорудного концентрату на рівні 65% умісту заліза і ставить вітчизняну металургійну продукцію в невідповідні умови на світовому ринку. Покращити ситуацію можна ліквідацією або зменшенням впливу цих факторів. Аналіз показує, що таких факторів поки що є значна кількість. Одним із них і досить вагомим є виникнення пульсацій матеріалу в барабані кульового млина під час його завантаження. При цьому процес взаємодії молоткових тіл (куль) із рудним матеріалом відхиляється від оптимального режиму: електроенергія, кулі й футерівка витрачаються, а матеріал недоподрібнюється. Виникати пульсації можуть під впливом завантаження в млин вихідної дробленої руди, пісків спірального класифікатора, води та куль. Оскільки завитковий живильник окремими дозами подає в млин найбільшу кількість матеріалу, яка у два й навіть більше разів може перевищувати вихідне живлення, об'єм одноразової захопленої дози може викликати пульсації пульпи в барабані, тому тема статті є актуальною. Крім того, цей об'єм захопленої дози визначає продуктивність кульового млина, а профіль завитка – рівномірність уведення в барабан матеріалу, що впливає на величину пульсацій. Стаття виконана в межах тематики наукових досліджень Центральноукраїнського національного технічного університету, зокрема за темою «Оптимізація параметрів завиткового живильника кульового млина пульпою як керованого об'єкта в рудопідготовці за двостадійним циклом» (реєстраційний номер 0123U102951).

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

На вхід кульового млина завантажуються вихідна руда, піски класифікатора, вода й кулі на заміну спрацьованого молоткового завантаження та футерівки технологічного агрегату. Насамперед покращити показники рудопідготовки в перших стадіях подрібнення руди може оптимізація використання енергії та матеріалів у кульових млинах. У роботі [1] виконано аналіз вітчизняного й зарубіжного практичного досвіду рудопідготовки, виокремлено фактори, які можуть вплинути на покращення енергетичної ефективності подрібнення руди кульовими млинами. Методом динамічного програмування здійснена оптимізація енергетичної ефективності подрібнення руди кульовими млинами, де розглядалося дев'ять стадій. Показано, що ефективність роботи кульового млина може покращитися до 2,5 разів порівняно з наявним

варіантом. Відповідно до даних процесу оптимізації, запропоновано шляхи реалізації покращення енергетичної ефективності подрібнення руди в кульових млинах у вигляді шести гілок, які можуть забезпечити результат, виходячи з побажання й можливостей підприємства. Аналіз показує, що доцільним є комплексне енергоефективне інваріантне керування певним конкретним циклом рудопідготовки збагачувальної фабрики. Перспективою подальших досліджень у цьому напрямі є реалізація запропонованих гілок організації процесу подрібнення руди залежно від умов конкретних збагачувальних фабрик і розроблення відповідних систем енергоефективного інваріантного керування їх технологіями. Однак запропоновані підходи неможливо ефективно реалізувати без позбавлення недопустимих за амплітудою і частотами пульсацій матеріальних мас у барабані кульового млина.

Розглянемо можливість виникнення пульсацій від кожного фактора. Транспортна система подавання руди в кульовий млин є досить складною. Її засоби розробляють давно й досягли високого рівня досконалості. Проблему завантаження-розвантаження бункерів із сипким матеріалом також розв'язують давно, досягнуті вагомі результати [2; 3; 4]. Теорія розроблених та експериментально перевічених теоретичних положень стосується добре сипучої суміші – це сипкий матеріал, який має невелику вологість і малий уміст тонких фракцій. Почали досліджувати процеси витікання сипких однорідних матеріалів. Дослідженню витікання з бункерів сипкого фракційного матеріалу зі значним умістом дрібних класів, до якого належать дроблені руди, увагу практично не приділяли. Водночас особливості розташування матеріалу на конвеєрній стрічці, причини, що його викликали, ніхто не вивчав. Результати таких досліджень подано в роботі [5]. У праці [6] встановлено, що ефект зміни крупності дробленої руди виникає в процесі її розвантаження із циліндричних накопичувальних бункерів. Оскільки технологічне обладнання дробильного процесу в разі використання спеціальних бункерів стабілізує середньозважену крупність руди, то вона на конвеєрній стрічці не змінюватиметься, що стабілізує умови роботи кульового млина. Однак у процесі спрацювання робочих поверхонь дробильного обладнання середньозважена крупність руди на вході кульового млина матиме тенденцію до плавного збільшення, що вимагає контролю цього параметра. У роботі [7] запропоновано підхід до вимірювання середньозваженої крупності дробленої руди. У такій ситуації вагоме значення має й точність конвеєрних ваг. На недоліки конвеєрних ваг указується з 1977 р. У 1986 р. відмічено, що недоліком конвеєрних ваг є недотримання гарантованої похибки вимірювання в основному через негативний вплив ступеня нерівномірності розташування матеріалу на конвеєрній стрічці. Такий недолік конвеєрних ваг практично ліквідовано покращенням рівномірності розташування матеріалу й заходами, запропонованими в працях [8; 9; 10]. Такий стан вирішення завдання гарантовано забезпечить відсутність пульсацій рудного матеріалу в барабані кульового млина.

Пульсації від подачі води в кульовий млин визначаються системою автоматичної стабілізації розрідження пульпи в барабані. Згідно з підходом стабілізації розрідження пульпи в кульовому млині, викладеному в праці [11], під час подрібнення конкретного різнотипу руди і плавної зміни її середньозваженої крупності пульсації по каналу подачі води в технологічному агрегаті виникнути не можуть.

Традиційно в кульові млини кулі на заміну спрацьованого молоткового середовища на вітчизняних збагачувальних фабриках уносять один раз на добу або навіть один раз на три доби. Маса куль, спрацьованих за одну або три доби, визначається тоннами, що при завантаженні в млин збуджує великі пульсації матеріалу впродовж значного часу. Це різко відхиляє умови подрібнення руди від оптимальних і призводить до перевитрачання електроенергії, куль і футерівки. У роботі [12] доведена можливість стабілізації оптимального різнорозмірного кульового завантаження барабанного млина реалізацією алгоритмів оцінювання його стану. Тут доведена можливість поштучної подачі різнорозмірних куль у млин за короткий термін роботи, що не збуджує пульсацій матеріального середовища в технологічному агрегаті.

Піски спірального класифікатора відрізняються циклічною подачею і великою продуктивністю, оскільки циркулююче навантаження в цьому циклі подрібнення може в кілька разів перевищувати вихідне живлення млина рудою. Зважаючи на те що в механічних спіральних класифікаторах використовують двозахідні спіралі, за один їх оберт у пісковий жолоб виштовхуються дві дози пісків, які змішуються з доданою водою й надходять у приймальний пристрій завиткового живильника кульового млина, створюючи в ньому змінний рівень пульпи залежно від циркулюючого навантаження. Зрозуміло, що прямо в млин таке циклічне розвантаження класифікатора подавати неможливо, зважаючи на виникнення пульсацій пульпи. Завитковий живильник дещо може послабити такий вплив на кульовий млин, ураховуючи його особливості.

Завитковий живильник [13] являє собою черпак спіральної форми з круглим отвором у боковій стінці для завантаження зачерпнутого матеріалу в млин. Фланець живильника болтами кріпиться до цапфи барабана млина так, щоб отвори цапфи й живильника збігалися. Корпус живильника виготовляється з листової сталі або відливається з легованого чавуну. На кінці черпака живильника кріпиться змінний козирок із марганцевистої сталі або з легованого чавуну. Внутрішня поверхня живильника футерується сталевими листами. Завиткові живильники виготовляються одно-, дво- і тричерпаковими. Поперечний перетин між спіралями живильника прямокутний. Завиткові живильники дають змогу завантажувати матеріал, що надходить на подрібнення, з більш низького рівня, що дає можливість установлювати млини в замкненому циклі з класифікаторами. Здебільшого використовують двочерпакові завиткові живильники. Аналогічні визначення завиткових живильників даються й в інших літературних джерелах. Це говорить про те, що завитковий живильник розглядається як деякий допоміжний елемент у технологічному ланцюзі циклів подрібнення. Однак більш уважний аналіз показує, що завитковий живильник барабанних млинів має свої конкретні характеристики й повинен розглядатися як рівноцінний керований об'єкт поряд з іншим технологічним обладнанням. Зокрема, ніде не вказується, що це за завиток, які його характеристики, як конкретно він повинен приєднуватися до барабанного млина. Зрозуміло, що під час виходу кінця черпака з поверхні пульпи в приймальному пристрої живильника завитковий елемент (захватний орган) повинен від масиву рідини відділити певну її дозу. Величина захопленої дози буде визначатися профілем завитка й початковою його установкою за певного рівня пульпи. Ці два параметри завитка повинні бути відомі, однак про них мова не ведеться. Найбільш простим способом налагодження завиткового живильника на процес захоплення доз пульпи в приймальному пристрої в початковому стані є поворот системи координат завитка. Для доведення можливості такого підходу налагодження технологічного агрегату необхідно здійснити математичне моделювання об'єму захопленої дози пульпи завитком живильника при повороті системи координат.

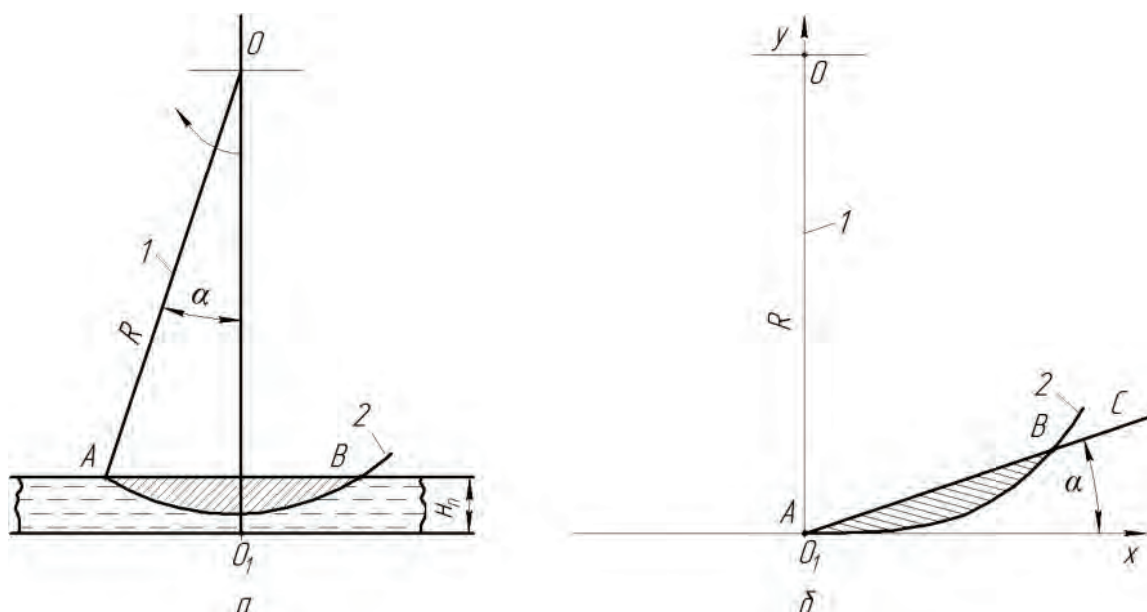
### Мета дослідження

**Метою дослідження** є встановлення можливості налаштування завиткового живильника на процес захоплення доз пульпи в приймальному пристрої поворотом декартової системи координат завитка.

### Виклад основного матеріалу

Завиткові живильники використовують для подачі рідкого матеріалу з нижньої відмітки на певну верхню. Здебільшого так організовується подача пульпи в кульовий млин, що живиться пісковим продуктом класифікаторів. Завитковий живильник приєднують до барабана млина, і він обертається разом із ним. У процесі роботи рівень пульпи в приймальному пристрої завиткового живильника змінюється. При цьому змінюється й процес захоплення дози рідкого матеріалу завитком. Об'єм захопленої дози за певного рівня пульпи й ширини захватного органа однозначно характеризується її площею поздовжнього перерізу в завитку, що виходить на поверхню рідини. Імітація захоплення дози рідкого матеріалу завитком показана

на рис. 1, а, де площа поздовжнього перерізу захопленої дози заштрихована. Вона обмежена рівнем пульпи  $H_{II}$  в приймальному пристрої (пряма  $AB$ ) і частиною профілю 2 завитка. Профіль завитка 2 в початковій точці  $A$  жорстко з'єднаний із жорстким елементом 1, що обертається навколо точки  $O$ . Під час обертового руху елементів 1 і 2 відбувається захоплення дози рідкого матеріалу й завдяки профілю завитка 2 (на рисунку не показано) відбувається транспортування її до точки  $O$ , де здійснюється розвантаження рідкого матеріалу на вищому рівні. Між вертикаллю  $OO_1$  і жорстким елементом 1 створюється кут  $\alpha$ , пропорційний рівню пульпи  $H_{II}$  у приймальному пристрої. Чим вищим буде рівень  $H_{II}$ , тим більшим буде кут  $\alpha$ . Із рис. 1, а видно, що в разі зміни рівня пульпи  $H_{II}$  в приймальному пристрої точка  $A$  змінює своє положення в просторі й не може однозначно характеризувати налагоджувальні параметри пристрою. Тому надамо їй певного фіксованого однозначного положення, повернувши жорсткий елемент 1 у вертикальне положення, сумістивши його з вертикальною віссю  $OO_1$  і перемістивши однозначно профіль завитка 2 й захоплену ним дозу рідкого матеріалу. Таке моделювання показано на рис. 1, б, де додатково приведені осі декартової системи координат  $x, y$  і пряма  $AB$ , продовжена до точки  $C$ , що являє собою промінь, який відповідає рівню пульпи в завитковому живильнику й проходить під кутом  $\alpha$  до осі абсцис  $O_1X$  на рис. 1, б. Точка  $B$  на рис. 1, б відповідає точці  $B$  на рис. 1, а.



**Рис. 1. Імітація (а) і моделювання (б) захоплення дози рідкого матеріалу завитком: 1 – жорсткий елемент довжиною, що дорівнює радіусу  $R$  обертання завитка; 2 – профіль завитка**

Це положення профілю завитка дає змогу досліджувати вплив на захоплення доз рідини в приймальному пристрої під час виконання певних налагоджувальних дій. Наприклад, можна здійснити паралельне перенесення системи координат (рис. 1, б), її поворот на певний кут, поворот і паралельне перенесення системи координат.

Здійснимо поворот системи координат (рис. 1, б) на кут  $\varphi$ . Ця математична операція демонструється на рис. 2. Дослідження виконаємо, наприклад, на профілі завитка 1 (рис. 2), що описується функцією  $y=x^k$ . Це рівняння  $y=x^k$  справедливе в новій (поверненій на кут  $\varphi$ ) системі координат  $y', x'$ . У старій системі координат  $x, y$  його необхідно подати, урахувавши кут повороту  $\varphi$ . Будь-яка точка, нехай це буде точка  $B$  (рис. 2) перетину кривої профілю завитка й прямої, що визначена кутом нахилу  $\alpha$  до осі абсцис, у старій системі за однакових одиниць масштабу на осях матиме такі залежності визначення значень координат [14]:

$$y_B = x'_B \sin \varphi + y'_B \cos \varphi, \quad (1)$$

$$x_B = x'_B \cos \varphi - y'_B \sin \varphi, \quad (2)$$

де  $x'_B, y'_B$  – координати точки  $B$  у поверненій на кут  $\varphi$  системі координат;  $x_B, y_B$  – координати точки  $B$  у системі координат без повороту;  $\varphi$  – кут повороту координат.

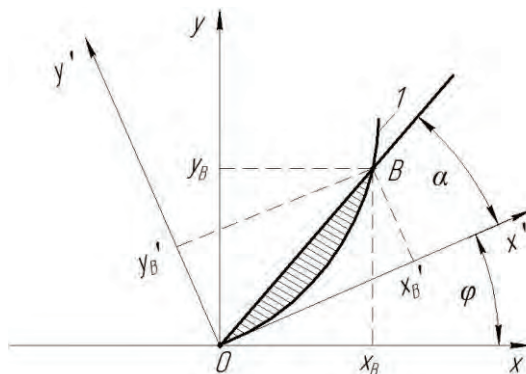


Рис. 2. Поворот системи координат із профілем завитка й захопленою дозою рідкого матеріалу:  
1 – профіль завитка

У новій (поверненій на кут  $\varphi$ ) системі координат для точки  $B$  (рис. 2) буде справедлива залежність для профілю завитка:

$$y'_B = (x'_B)^k. \quad (3)$$

Добувши корінь  $k$  з лівої і правої частин (3), отримаємо рівняння:

$$x'_B = \sqrt[k]{y'_B}. \quad (4)$$

Рівняння прямої  $y = x \operatorname{tg} \alpha$ , де  $\operatorname{tg} \alpha = k_1$  – кутовий коефіцієнт нахилу прямої, що проходить через початок координат із нахилом під кутом  $\alpha$  до осі абсцис у старій системі координат і перетинається в точці  $B$  з кривою, що визначає профіль завитка, дає змогу із залученням (1) і (2) записати таке співвідношення:

$$x'_B \sin \varphi + y'_B \cos \varphi = (x'_B \cos \varphi - y'_B \sin \varphi) \operatorname{tg} \alpha \quad (5)$$

або

$$y'_B (\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha) = x'_B (\cos \varphi \operatorname{tg} \alpha - \sin \varphi), \quad (6)$$

звідки:

$$y'_B = x'_B \frac{\cos \varphi \operatorname{tg} \alpha - \sin \varphi}{\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha}. \quad (7)$$

Підставимо (7) у (4) і, виконавши перетворення, отримаємо:

$$x'_B = k^{-1} \sqrt[k]{\frac{\cos \varphi \operatorname{tg} \alpha - \sin \varphi}{\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha}}. \quad (8)$$

З урахуванням (8) за рівнянням (7) отримаємо:

$$y'_B = k^{-1} \sqrt[k]{\left( \frac{\cos \varphi \operatorname{tg} \alpha - \sin \varphi}{\cos \varphi + \sin \varphi \operatorname{tg} \alpha} \right)^k}. \quad (9)$$

Отже, координати точки  $B$  у новій координатній системі можна визначати за залежностями (8) і (9), а в старій координатній системі – за знайденими  $x'_B$  і  $y'_B$  та виразами (1) і (2).

З рівнянь (8) і (9) видно, що в загальному випадку (особливо за непарних  $k$ ) необхідно виконати умову:

$$\cos \varphi \operatorname{tg} \alpha > \sin \varphi. \quad (10)$$

Поділимо ліву і праву частину нерівності (10) на  $\cos\varphi$  та отримаємо:

$$\operatorname{tg}\alpha > \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} \text{ або } \operatorname{tg}\alpha > \operatorname{tg}\varphi, \quad (11)$$

звідки  $\alpha > \varphi$ . Тобто кут повороту системи координат повинен бути меншим за кут  $\alpha$ , що визначається рівнем пульпи в приймальній пристрої завиткового живильника.

Якщо на мінімальному значенні рівня пульпи  $H_{II} = 0,1$  м, кут  $\alpha = 14^\circ 50'$ ,  $\operatorname{tg}14^\circ 50' = 0,2648$ , кут  $\varphi$  можна прийняти на рівні кут  $\varphi = 10^\circ$ . Тоді  $\cos 10^\circ = 0,9848$ ;  $\sin 10^\circ = 0,1736$ ; прийmemo  $k = 3$ , тобто  $y = x^3$ .

Відповідно до прийнятих умов і залежностей (8) і (9), координати точки  $B$  у новій системі координат будуть  $x'_B = 0,2908$  ум. од.,  $y'_B = 0,024594$  ум. од., а в старій системі координат за виразами (1) і (2) –  $x_B = 0,2821$  ум. од.,  $y_B = 0,074706$  ум. од. Варто зауважити, що в разі повороту системи координат на кут  $\varphi$  профіль завитка змінює своє положення на більш круте, тому він більш точно описується виразом  $y = x^3$ , за яким його побудували. Навпаки, у старій системі координат профіль завитка став більш похилим і його краще описувати виразом  $y = x^2$ . Наприклад, за аргументу  $x_B = 0,2821$  ум. од.,  $y_B$  становив  $0,074706$  ум. од. Якщо прийняти  $x_B = 0,2821^2$ , то  $y_B = 0,079580$  ум. од., що на  $6,5\%$  більше за отримане за (1) значенням. Це допустимо в таких дослідженнях. Тому в старій системі координат  $y, x$  будемо застосовувати залежність  $y = x^2$ .

Визначимо площі поздовжніх перерізів захоплених доз пульпи в старій і новій системах координат. Ці площі можна визначити як різницю площ трикутників  $OBX'_B$  й  $OBX_B$  та відповідних їм площ фігур, створених профілем завитка, вісями абсцис і відрізками  $BX'_B$  і  $BX_B$ .

Площа трикутника  $OBX_B$  у старій системі координат  $S_{\Delta C} = 0,5 \cdot y_B \cdot x_B = 0,010538$  ум. кв. од.

Площа трикутника  $OBX'_B$  у новій (поверненій на кут  $\varphi$ ) системі координат  $Y'OX'S_{\Delta H} = 0,5 \cdot y'_B \cdot x'_B = 0,00357692$  ум. кв. од.

Визначимо площі фігур під кривою завитка, тобто знайдемо площі фігури, обмеженої віссю абсцис, відрізками прямих  $x = a$  і  $x = b$ , паралельних осі ординат, і графіком функції  $y = f(x)$  для значень  $x \in [a, b]$ . Такі фігури являють собою криволінійні трапеції. Їх бічні відрізки можуть вироджуватися в точки. Відомо, коли функція  $f(x)$  невід'ємна на відрізку  $[a, b]$  і неперервна на ньому, то визначений інтеграл від цієї функції в межах від  $a$  до  $b$  чисельно дорівнює площі відповідної криволінійної трапеції [15]. Тобто визначений інтеграл можна розглядати як границю інтегральної суми функції  $f(x)$  на відрізку  $[a, b]$ , під якою розуміють суму добутків довжини кожного елементарного відрізка  $\Delta x_i$  на значення функції  $f(x)$  в довільній точці його протяжності [15]. Якщо функція  $f(x)$  невід'ємна на відрізку  $[a, b]$ , то інтегральна сума  $S_n$  виражає площу фігури, яка складається з приєднаних один до одного прямокутників, основами яких слугують елементарні відрізки  $\Delta x_i$ , а висотами – значення функції в обраних точках на цих відрізках [15]. Відомо [15], коли функція  $f(x)$  неперервна на відрізку  $[a, b]$ , то границя інтегральної суми існує й не залежить ні від способу розбиття відрізка  $[a, b]$  на елементарні частини, ні від вибору точок на них. В окремих випадках ці точки можуть збігатися з початком або кінцем елементарного відрізка. Однак зі збільшенням кількості  $n$  елементарних частин на відрізку  $[a, b]$  інтегральна сума все точніше відповідає площі криволінійної трапеції, оскільки довжина елементарних відрізків скорочується.

Визначимо параметри для оцінювання площі криволінійної трапеції в старій системі координат. Приймемо довжину елементарного відрізка  $\Delta x_i = 0,03$  ум. од. Останній елементарний відрізок буде визначатися залишком загального відрізка  $[a, b]$ . Унаслідок зміни положення криволінійної трапеції в старій системі координат завиток буде описуватися функцією  $y = x^2$ . Ординату функції визначатимемо в кінці відрізків  $\Delta x_i$ . Дані розрахунків для оцінювання площі криволінійної трапеції приведемо в таблиці 1. Відповідно до даних таблиці 1, площа криволінійної трапеції в старій системі координат становила  $S_{KTC} = 0,008479$  ум. кв. од.



Таблиця 1

**Дані оцінювання площі криволінійної трапеції в старій системі координат**

Довжина елементарних відрізків $\Delta x_i$ , ум. од.	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01
Аргументи функції $y = x^2$ , $x_i$ , ум. од.	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,28
Значення функції $y_i \times 10^{-4}$ , ум. од.	9	36	81	144	225	324	441	576	729	784
Площі елементарних прямокутників $S_i \times 10^{-6}$ , ум. кв. од.	27	108	243	432	675	972	1323	1728	2187	784
Площа криволінійної трапеції $S_{KTC}$ , ум. кв. од.	0,008479									

Дані оцінювання площі криволінійної трапеції в новій (поверненій на кут  $\phi$ ) системі координат подано в таблиці 2. Відповідно до даних таблиці 2, площа криволінійної трапеції в новій системі координат становила  $S_{КТН} = 0,002128$  ум. кв. од.

Таблиця 2

**Дані оцінювання площі криволінійної трапеції в новій (поверненій на кут  $\phi$ ) системі координат**

Довжина елементарних відрізків $\Delta x_i$ , ум. од.	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Аргументи функції $y = x^3$ , $x_i$ , ум. од.	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,29
Значення функції $y_i \times 10^{-6}$ , ум. од.	27	216	729	1728	3375	5832	9261	13824	19683	24389
Площі елементарних прямокутників $S_i \times 10^{-8}$ , ум. кв. од.	81	648	2187	5184	10125	17496	27783	41477	59049	48778
Площа криволінійної трапеції $S_{КТН}$ , ум. кв. од.	0,002128									

Поздовжня площа захопленої дози рідкого матеріалу в старій системі координат дорівнює:

$$S_{gC} = S_{\Delta C} - S_{KTC} = 0,002059 \text{ ум. кв. од.} \tag{12}$$

Поздовжня площа захопленої дози рідкого матеріалу в новій (поверненій на кут  $\phi$ ) системі координат дорівнює:

$$S_{gH} = S_{\Delta H} - S_{КТН} = 0,001449 \text{ ум. кв. од.} \tag{13}$$

Оскільки поздовжня площа повністю характеризує захоплену дозу рідкого матеріалу, то судження можна робити за виразами (12) і (13).

З приведених виразів видно, що об'єм захопленої дози в разі повороту на кут  $\phi = 10^\circ$  системи координат значно менший порівняно з показником без повороту. Зменшення об'єму захопленої дози завитком в разі повороту системи координат становить 29,63%, що суттєво. Це негативно впливає на продуктивність живильника й призведе до перевитрати електроенергії на транспортування пульпи.

**Висновки**

Отже, у процесі проведених досліджень встановлено, що налагодження завиткових живильників недоцільно здійснювати поворотом системи координат. Необхідно розробити оригінальний підхід формування профілю завитка й фази встановлення його початку для забезпечення оптимальних параметрів завиткового живильника.

Перспективою подальших досліджень є розроблення такого підходу формування профілю завитка й обґрунтування його встановлення стосовно завантажувальної горловини млина.

Список використаної літератури

1. Мацуй А.М., Кондратець В.О. Оптимізація використання енергії та матеріалів у кульових млинах при енергоефективному інваріантному керуванні подрібненням руд. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2022. Том 33(72). № 2. С. 91–99.
2. Walters J.K. A Theoretical Analysis of stresses in Silos with Vertical Walls. *Chemical Engineering Science*. 1973. Vol. 28. P. 13–21.
3. Cowin S.C. The Theory of Static Loads in Bins. *Journal of Applied Mechanics*. 1977. Vol. 44. № 9. P. 409–412.
4. Takami A., Syoten O.A. Theory of the Pressure Distribution in Powder in Equilibrium in a Cylindrical Vessel. *Powder Technology*. 1974. Vol. 10. P. 295–301.
5. Кондратець В.О. Математичне моделювання формування потоків рудного живлення кульових млинів при транспортуванні. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2014. № 2(49). С. 42–50.
6. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Моделювання розподілу дробленої руди вздовж конвеєрної стрічки при розвантаженні бункерів. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 3. С. 42–50.
7. Кондратець В.О., Мацуй А.М. Сферична частинка твердого певного розміру як основа процесу моделювання розпушення гірських порід. *Математичне моделювання*. 2016. № 2(33). С. 55–59.
8. Конвеєрні ваги : пат. 93639 Україна : МПК G01G 11/00, G01G 11/04. № u201404655 ; заявл. 30.04.14 ; опубл. 10.10.14. Бюл. № 19. 6 с.
9. Конвеєрні ваги : пат. 113083 Україна : МПК G01G 11/00. № u201607168 ; заявл. 02.07.16 ; опубл. 10.01.17. Бюл. № 1. 7 с.
10. Конвеєрні ваги для сипкого матеріалу зі змінними характеристиками : пат. 118205 Україна : МПК G01G 11/00. № u201701647 ; заявл. 20.02.17 ; опубл. 25.07.17. Бюл. № 14. 8 с.
11. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням : пат. 152915 Україна : МПК B02C 25/00. № u202203993 ; заявл. 24.10.2022 ; опубл. 26.04.2023. Бюл. № 17. 4 с.
12. Стабілізація оптимального різнорозмірного кульового завантаження барабанного млина реалізацією алгоритмів оцінювання його стану / В.О. Кондратець та ін. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2022. Том 33(72). № 4. С. 97–102.
13. Підготовка корисних копалин до збагачення / М.І. Сокур та ін. Кременчук : П.П. Щербатих, 2017. 392 с.
14. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 1130 p.
15. Дубовик В.П., Юрик І.І. *Вища математика*. Київ : АСК, 2011. 636 с.

References

1. Matsui, A.M. & Kondratets, V.O. (2022). Optymizatsiia vykorystannia enerhii ta materialiv u kulovykh mlynakh pry enerhoefektyvnomu invariantnomu keruvanni podribnenniam rud – [Optimisation of energy and material use in ball mills with energy efficient invariant control of ore grinding]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu im. V.I. Vernadskoho. Seriia "Tekhnichni nauky"*. Vol. 33(72). Is. 2. P. 91–99. doi: 10.32838/2663-5941/2022.2/15 [in Ukrainian]
2. Walters, J.K. (1973). A Theoretical Analysis of stresses in Silos with Vertical Walls. *Chemical Engineering Science*. Vol. 28. P. 13–21. [in English]
3. Cowin, S.C. (1977). The Theory of Static Loads in Bins. *Journal of Applied Mechanics*. Vol. 44(9). P. 409–412. [in English]

4. Takami, A. & Syoten, O.A. (1974). Theory of the Pressure Distribution in Powder in Equilibrium in a Cylindrical Vessel. *Powder Technology*. Vol. 10. P. 295–301. [in English]
5. Kondratets, V.O. (2014). Matematychnе modeliuвання formuvannya potokiv rudnoho zhyvlennia kulovykh mlyniv pry transportuvanni – [Mathematical modeling formayion of streams ore supply ball mill when transporting]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. Vol. 2(49). P. 42–50. [in Ukrainian]
6. Kondratets, V.O. & Matsui, A.M. (2015). Modeliuвання rozpodilu drobenoi rudy vzdovzh konveirnoi strichky pry rozvantazhenni bunkeriv – [Modeling of distributed crushed ore along the conveying belt in offloading hoppers]. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. Vol. 3. P. 42–50. [in Ukrainian]
7. Kondratets, V.O. & Matsui, A.M. (2016). Sferychna chastynka tverdoho pevnoho rozmiru yak osnova protsesu modeliuвання rozpushennia hirskykh porid – [Spherical solid particle of a certain size as a basis for rock loosening modelling process]. *Matematychnе modeliuвання*. Vol. 2(33). P. 55–59. [in Ukrainian]
8. Konveierni vahy : pat. 93639 Ukraina : MPK G01G 11/00, G01G 11/04. № u201404655 ; zaiavl. 30.04.14 ; opubl. 10.10.14. Biul. № 19. 6 p.
9. Konveierni vahy : pat. 113083 Ukraina : MPK G01G 11/00. № u201607168 ; zaiavl. 02.07.16 ; opubl. 10.01.17. Biul. № 1. 7 p.
10. Konveierni vahy dlia sypkoho materialu zi zminnymy kharakterystykamy : pat. 118205 Ukraina : MPK G01G 11/00. № u201701647 ; zaiavl. 20.02.17 ; opubl. 25.07.17. Biul. № 14. 8 p.
11. Sposib avtomatychnoi stabilizatsii rozridzhennia pulpy v mlynakh z tsyrkuliuiuchym navantazhenniam : pat. 152915 Ukraina : MPK V02S 25/00. № u202203993 ; zaiavl. 24.10.2022 ; opubl. 26.04.2023. Biul. № 17. 4 p.
12. Kondratets, V.O., Meleshko, Ye.V., Matsui, A.M. & Abashyna, A.A. (2022). Stabilizatsiia optymalnoho riznorozmirnoho kulovoho zavantazhennia barabannoho mlyna realizatsiieiu alhorytmiv otsiniuvannya yoho stanu – [Stabilisation of optimum different-size ball loading of a drum mill by the implementation of algorithms for assessing its condition]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu im. V.I. Vernadskoho. Seriia "Tekhnichni nauky"*. Vol. 33(72). Is. 4. P. 97–102. doi: 10.32838/2663-5941/2022.4/16 [in Ukrainian]
13. Sokur, M.I., Biletskyi, V.S., Yehurnov, O.I. Vorobiov, O.M., Smyrnov, V.O. & Bozhyk, D.P. (2017). Pidhotovka korysnykh kopalyn do zbahachennia – [Preparation of minerals for beneficiation]. Kremenchuk : P.P. Shcherbatykh. [in Ukrainian]
14. Korn, G.A. & Korn, T.M. (1968). *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. New York : McGraw-Hill Book Company. [in English]
15. Dubovyk, V.P. & Yuryk, I.I. (2011). *Vyshcha matematika – [Higher mathematics]*. Kyiv : ASK. [in Ukrainian]

Кондратець Василь Олександрович – д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, e-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1411-168X.

Мацуй Анатолій Миколайович – д.т.н., професор, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, e-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5544-0175.

Сербул Олександр Миколайович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, e-mail: serbulan@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1836-5529.

Федотова Маріанна Олександрівна – к.т.н., асистент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, e-mail: skrynnik\_2002@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5827-1685.

Kondratets Vasyl Oleksandrovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Automation of Production Processes of the Central Ukrainian National Technical University, e-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1411-168X.

Matsui Anatolii Mykolaiovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes of the Central Ukrainian National Technical University, e-mail: matsuyan@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5544-0175.

Serbul Oleksandr Mykolaiovych – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes of the Central Ukrainian National Technical University, e-mail: serbulan@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1836-5529.

Fedotova Marianna Oleksandrivna – Ph.D., Assistant at the Department of Automation of Production Processes of the Central Ukrainian National Technical University, e-mail: skrynnik\_2002@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5827-1685.

## ФІЛЬТРАЦІЯ ЗАВАД БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ: ОПТИМІЗАЦІЙНИЙ ПІДХІД

*У статті пропонується метод пригнічення адитивних завад на цифрових растрових зображеннях, отриманих у довільній кількості спектральних інтервалів проміння – носія видової інформації. Метод базується на компресії кодів яскравості зображень, оптимізованих за двома критеріями: 1) мінімізація відносної інформаційної ентропії скомпресованого зображення стосовно первинного (безпосередньо зафіксованого) зображення; 2) максимізація відношення сигнальної енергії інформативного сигналу, збереженої в скомпресованому зображенні, до сигнальної енергії завади (відношення «сигнал/шум»).*

*Реалізація пропонованого методу включає такі етапи: подання множини зображень спектральних каналів єдиним багатовимірним геометричним об'єктом (БГО) у вигляді масиву даних, упорядкованих за растром і спектральними інтервалами; розгортка Пеано-Гільберта БГО з отриманням одновимірного цифрового сигналу; компресія цифрових значень розгортки за зазначеними критеріями; реконструкція кодів яскравості скомпресованих зображень спектральних каналів функціональним перетворенням, оберненим стосовно використаного за компресії.*

*Фільтрація завад з одночасною компресією цифрових кодів яскравості зображень реалізована на основі розкладів цих кодів по дискретних ортонормованих функціональних базисах, обнуління частин коефіцієнтів розкладу й наступної реконструкції розподілів яскравості зображень. Визначення порогів обнуління коефіцієнтів розкладів цифрових рівнів яскравості сформульовано у вигляді двокритеріальної оптимізаційної задачі мінімізації відхилень відносної інформаційної ентропії скомпресованого зображення стосовно вихідного зображення та відношення «сигнал/шум» у скомпресованому зображенні від наперед заданих значень.*

*Пропонований метод забезпечує компроміс між вимогами збільшення відношення «сигнал/шум» і збереження інформативності синтезованих зображень стосовно первинних видових даних.*

*Зіставлення різних дискретизованих функціональних базисів як основи для компресії розподілів яскравості показало найбільшу ефективність за зазначеними критеріями базису Хартлі.*

*Ключові слова: багатоспектральне зображення, інформаційна відстань, відношення «сигнал/шум», розгортка Пеано-Гільберта, дискретне ортонормоване перетворення.*

## NOISE FILTERING OF MULTISPECTRAL DIGITAL SIGNALS: OPTIMIZATION APPROACH

*The article proposes a method of filtering additive noise on digital raster images obtained in an arbitrary number of spectral intervals of radiation – the carrier of species information. The method is based on compression of image brightness codes, optimized according to two criteria: 1) minimization of the relative information entropy of the compressed image relative to the primary (directly fixed) image; 2) maximizing the ratio of the signal energy of the informative signal stored in the compressed image to the signal interference energy (signal-to-noise ratio).*

*The implementation of the proposed method includes the following steps: representation of a set of images of spectral bands by a single multidimensional geometric object (MGO) in the form of a data array, ordered by raster and spectral intervals; Peano-Hilbert reamer of MGO with obtaining a one-dimensional digital signal; compression of reamer values according to the specified criteria; reconstruction of brightness codes of compressed images of spectral bands by functional transformation inverse to that used by compression.*

*Noise filtering with simultaneous compression of digital brightness codes of images is implemented on the basis of decompositions of these codes on discrete orthonormalized functional bases, zeroing the part of the decomposition coefficients and subsequent reconstruction of image brightness distributions. Determination of thresholds for zeroing coefficients of schedules of digital brightness levels is formulated in the form of a two-criteria optimization problem of minimizing the deviations of the relative information entropy of the compressed image with respect to the original image and the signal-to-noise ratio in the compressed image from predetermined values.*

*The proposed method provides a compromise between the requirements of increasing the signal-to-noise ratio and preserving the informativeness of the synthesized images in relation to the primary species data.*

*Comparison of different discretized functional bases as the basis for compression of brightness distributions showed the greatest efficiency according to the specified criteria of the Hartley basis.*

*Key words: multispectral image, information distance, signal-to-noise ratio, Peano-Hilbert reamer, discrete orthogonal transformation.*

### Постановка проблеми

Розглядаються цифрові растрові зображення, зафіксовані водночас у декількох спектральних діапазонах електромагнітного проміння – носія видової інформації. З позицій тематичного аналізу таких зображень їх найважливішим інформаційним показником є розрізняльна здатність, яка збільшується зі зменшенням довжини хвилі проміння. Фіксація таких багато-спектральних зображень неминуче супроводжується формуванням на них графічних завад, зумовлених нестабільностями середовища поширення проміння, наявністю яких утруднює тематичний аналіз та інтерпретацію зображень. Велика розмірність растру, забезпечувана сучасними засобами дистанційного зондування, потребує значних обчислювальних ресурсів для їх автоматизованого аналізу. У зв'язку з цим актуальна двоєдина проблема фільтрації графічних завад на таких зображеннях у поєднанні з компресією (стисненням) зображень за умови збереження рівня інформативності, необхідного для їх достовірного тематичного аналізу.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питанням пригнічення фільтрації графічних завад на растрових зображеннях і компресії таких зображень присвячена значна кількість досліджень, у яких ці питання розглядаються окремо – без їх зв'язку. Численні алгоритми фільтрації графічних завад базуються на різних варіантах лінійної та нелінійної обробки кодів яскравості зображень без зв'язку з компресією цифрових зображень (див., наприклад монографію [1]). Більшість відомих методів компресії цифрових сигналів базується на їх розкладі по одному з ортогональних дискретних функціональних базисів [2–4]. Питання, пов'язані з перетворенням рівня завад за такої компресії, не розглядалися.

### Мета дослідження

Мета статті полягає в розробленні методу пригнічення графічних завад (шумів) на растрових цифрових зображеннях, зафіксованих у довільній кількості спектральних інтервалів проміння – носія видової інформації, оптимального за критеріями максимізації відношення «сигнал/шум» (SNR) і мінімізації інформаційної відмінності вихідних і синтезованих зображень шляхом компресії вихідних зображень із контрольованим рівнем збереження їх інформативності.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Сукупність растрових зображень, поданих на растрі розміром  $N \times M$  пікселів і зафіксованих у  $k$  спектральних інтервалах, подаємо масивом  $D_{N \cdot M \times k}$  стовпці якого отримані розгорткою растру спектральних інтервалів уздовж його рядків. Для редукції вимірності  $D_{N \cdot M \times k}$  використовуємо його розгортку  $V(x)$ , отриману за алгоритмом Пеано [5].

Здійснюємо розклад отриманої розгортки по заданому дискретному ортонормованому базису (використовувалися базиси Уолша, Хартлі й дискретне косинусне перетворення [2]):

$$V(x) = \sum_{n=1}^L c_n \cdot u_n(x), \quad (1)$$

де  $u_n(x)$  – базисні функції;  $c_n$  – коефіцієнти розкладу;  $L$  – довжина розгортки.

Здійснимо перетворення множини коефіцієнтів розкладу (1):  $C_n = c_n$  при  $n = \overline{1, T}$ ;  $C_n = 0$  при  $n \geq T$ . Компресія здійснюється оберненим перетворенням:

$$V_c(x) = \sum_{k=1}^L C_k \cdot u_k(x). \quad (2)$$

За міру інформаційної відмінності скомпресованого сигналу з розподілом частот його елементів  $p(x)$  від первинного сигналу з розподілом частот  $q(x)$  прийнято відносну ентропію Кульбака-Лейблера [6]:

$$L(p \parallel q) = \int_x p(x) \cdot \log_2 \left[ \frac{p(x)}{q(x)} \right] \cdot dx, \quad (3)$$

де  $p(x)$ ,  $q(x)$  – відповідно, густини розподілів залежностей  $V(x)$  і  $V_c(x)$ .

Визначення порогу  $T$  обнуління коефіцієнтів розкладу (1) формулюємо як оптимізаційну задачу за критеріями мінімізації відхилень від наперед заданих значень відносної інформаційної ентропії та SNR результуючого зображення стосовно вихідного зображення.

Реконструкція перетворених зображень спектральних каналів здійснюється оберненим відображенням Пеано з наступним перетворенням, зворотнім до перетворення (1).

Тестування запропонованого методу здійснювалося з використанням ортонормованих базисів Уолша, Хартлі й дискретного косинусного перетворення.

На рисунках 1–4 подані зображення чотирьох спектральних каналів та адитивного гаусівського шуму з різними дисперсіями.

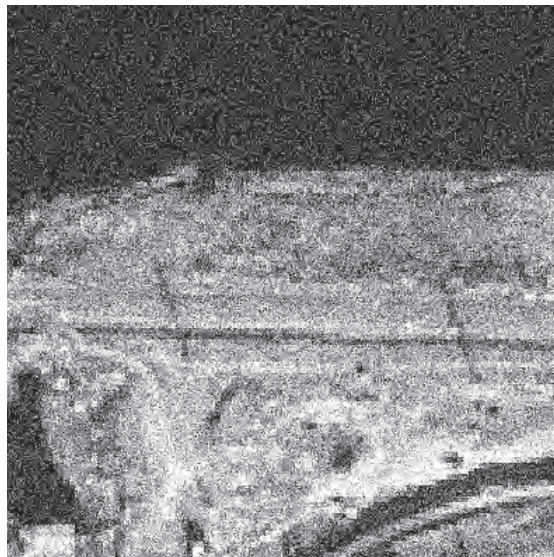


Рис. 1. Зображення спектрального каналу 0,77 мкм – 0,88 мкм, дисперсія шуму 0,04

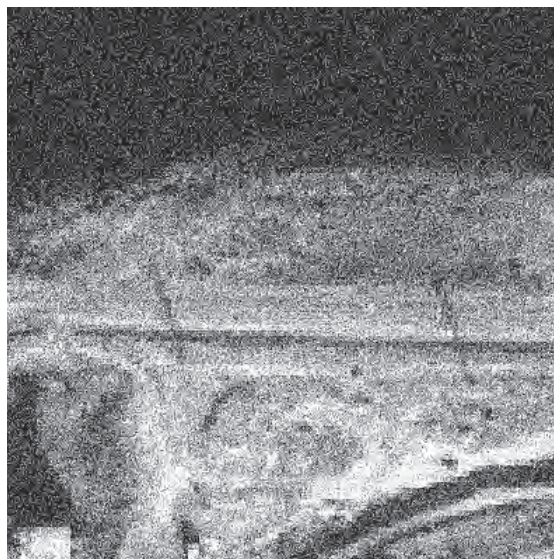


Рис. 2. Зображення спектрального каналу 0,64 мкм – 0,72 мкм, дисперсія шуму 0,04

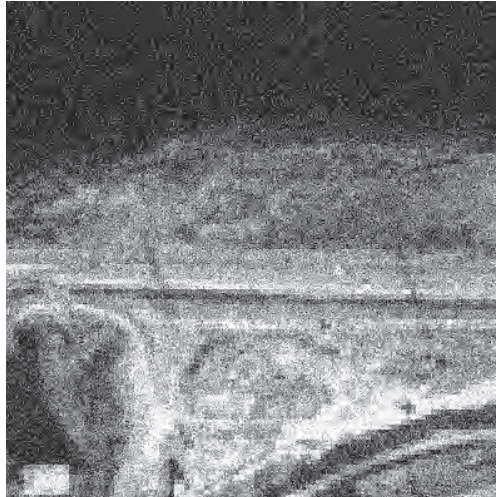


Рис. 3. Зображення спектрального каналу 0,52 мкм – 0,61 мкм, дисперсія шуму 0,0225

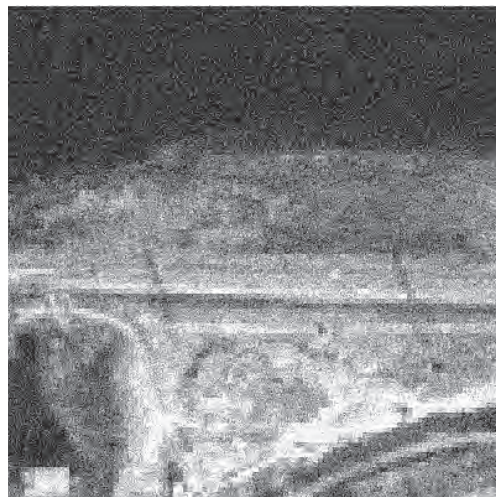


Рис. 4. Зображення спектрального каналу 0,45 мкм – 0,53 мкм, дисперсія шуму 0,0169

На рисунках 5–8 наведені зображення, відтворені за використання ортонормованого базису Харті з порогом обнуління коефіцієнтів розкладу, що забезпечує SNR на менше за 6,9771 дБ та відносну інформаційну ентропію  $L(p \parallel q)$  не більше ніж 0,4917 біт.

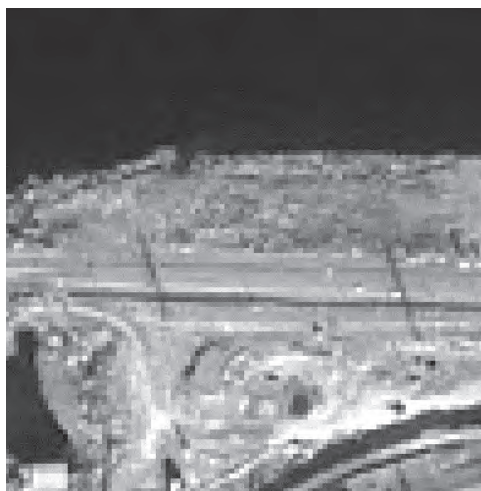


Рис. 5. Відновлене зображення спектрального каналу 0,77 мкм – 0,88 мкм



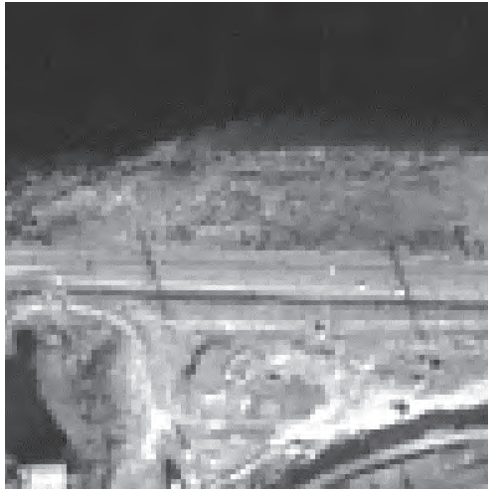


Рис. 6. Відновлене зображення спектрального каналу 0,64 мкм – 0,72 мкм

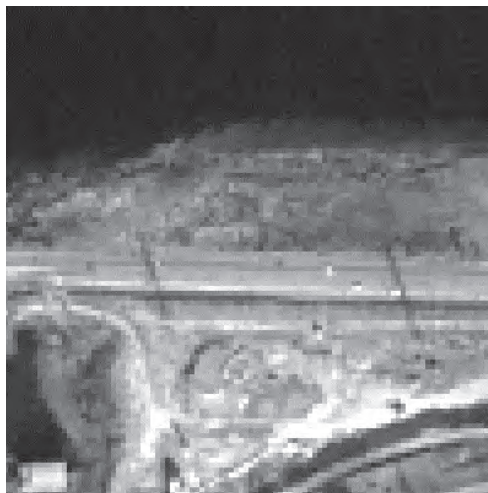


Рис. 7. Відновлене зображення спектрального каналу 0,77 мкм – 0,88 мкм

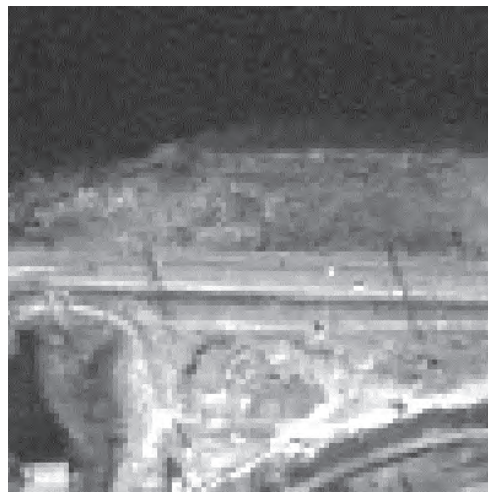


Рис. 8. Відновлене зображення спектрального каналу 0,77 мкм – 0,88 мкм

Як випливає з наведеної процедури компресії, у разі збільшення порогу обнуління коефіцієнтів розкладу розгортки Пеано-Гільберта зменшуються як потужність залишкового шуму, так і відстань Кульбака-Лейблера між вихідним і відновленим зображеннями. Із цього випливає, що між

SNR і цією відстанню існує обернена залежність. На рисунку 9 ця залежність показана стосовно дискретних функціональних базисів Уолша, Хартлі та дискретного косинусного перетворення.

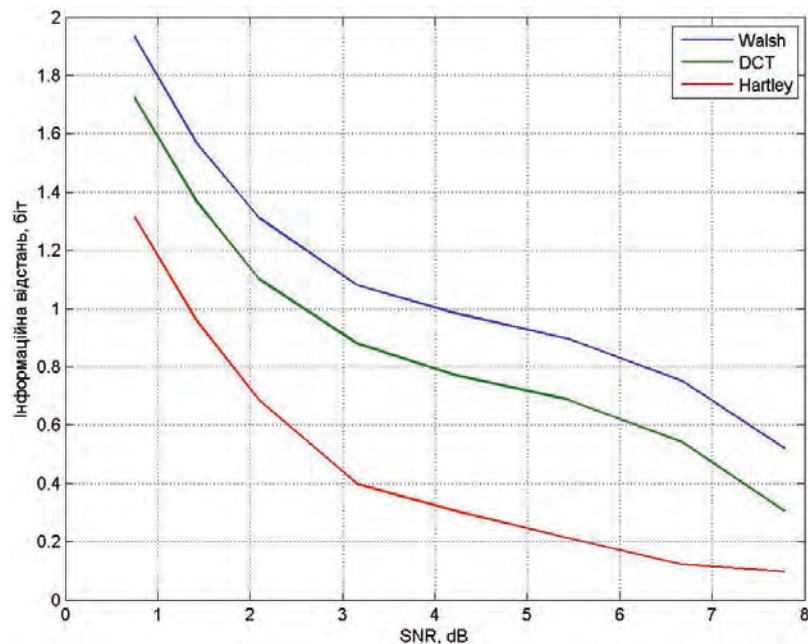


Рис. 9. Залежність інформаційної відстані від відношення SNR у відновлених зображеннях

Запропонований метод забезпечує оптимальний компроміс між вимогами мінімізації інформаційної відмінності вихідного та відновленого зображень і досягнення заданого значення відношення SNR.

### Висновки

Запропоновано новий метод пригнічення графічних завад на багатоспектральних цифрових зображеннях, оптимізований за інформаційним та енергетичним критеріями. Водночас забезпечується економія обчислювальних ресурсів, необхідних для автоматизованого тематичного аналізу багатоспектральних цифрових зображень. Подальші дослідження за проблематикою статті будуть спрямовані на збільшення пропускну здатності інформаційних каналів передачі багатоспектральних цифрових зображень дистанційного зондування.

### Список використаної літератури

1. Showengerdt R.A. Remote Sensing Models and Methods for Image Processing. N.-Y. : ELSEVIER, 2007. 560 p.
2. Ahmed N., Rao K.K. Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing. Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 1975, 248 p.
3. Корчинський В.М., Свиarenко Д.М. Оптимізаційний метод компресії багатоспектральних цифрових зображень проєкційної природи. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 24. С. 119–126.
4. Voloshin V.I., Korchinsky V.M., Kharitonov M.M. A Novel Method For Correction of Distortions and Improvement of Information Content in Sattelite-Acquired Multispectral Images. *Advances and Challengers in Multisensor Data and Information Processing*. Amsterdam : IOS Press, 2007. P. 315–323.
5. Sagan K. Space-Filling Curves. N.-Y. : Springer-Verlag, 1994. 194 p.
6. Cover T.M., Thomas J.A. Elements of information theory. N.-Y. : John Wiley & Sons, 1991. 320 p.

### References

1. Showengerdt, R. (2007). Remote Sensing Models and Methods for Image Processing. N.-Y. : ELSEVIER. [in English]
2. Ahmed, N. & Rao, K. (1975). Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing. Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag. [in English]
3. Korchynskyi V. & Svyarenko D. (2022). Optymizatsiinyi metod kompresii bahatospektralnykh tsyfrovyykh zobrazhen proektsiinoi pryrody – [Optimization method of compression of multispectral digital images of projection nature]. *Suchasni problemy modeliuвання*. Vol. 24. P. 119–126. doi: 10.33842/2313125X-2022-24-108-115
4. Voloshin V. I., Korchinsky V.M. & Kharitonov M.M. (2007). A Novel Method For Correction of Distortions and Improvement of Information Content in Sattelite-Acquired Multispectral Images. *Advances and Challengers in Multispectral Data and Information Processing*. Amsterdam : IOS Press. P. 315–323. [in English]
5. Sagan K. (1994). Space-Filling Curves. N.-Y. : Springer-Verlag. [in English]
6. Cover, T.M. & Thomas, J.A. (1991). Elements of information theory. N.-Y. : John Wiley & Sons.

Корчинський Володимир Михайлович – д.т.н., професор, завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, e-mail: korchins50k@i.ua, ORCID: 0000-0001-6621-0631.

Korchynskyi Volodymyr Mykhailovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Telecommunication Systems and Networks of Oles Honchar Dnipro National University, e-mail: korchins50k@i.ua, ORCID: 0000-0001-6621-0631.

## МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПЛОСКОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ В НЕОДНОРІДНОМУ НЕПОГЛИНАЮЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У роботі представлено аналітичні рішення параболічного рівняння Ісімару для функції когерентності електромагнітного поля, що описують часові властивості імпульсу на виході неоднорідного недисипативного середовища. Знайдено явний вираз функції Гріна завдання. Показано, що часова частина функції Гріна має інваріантну форму. Наведено також результати чисельних розрахунків форми досліджуваних часових імпульсів на виході прогонової ділянки середовища. Показано, що підхід, використаний у моделі Ісімару для опису тимчасової еволюції огинаючої монохроматичного електромагнітного імпульсу в однорідних недисипативних середовищах, може бути розвинений для використання в неоднорідних недисипативних середовищах. Зроблено спробу врахувати вплив неоднорідності середовища на форму результуючого імпульсу. Для вирішення поставленого завдання потрібно подолати труднощі, пов'язані з обчисленням континуального інтеграла, що виникає, у просторі дифузійних траєкторій. Це дало можливість отримати явний вираз для функції Гріна завдання й побудувати обчислювальний алгоритм, на базі якого проведено низку чисельних експериментів. Аналіз результатів роботи проведено на підставі апарату квадратичних інтегральних функціоналів, що базуються на рішеннях стохастичних диференціальних рівнянь. Із теорії подібних функціоналів отримано, що всі полюси функції Гріна  $G(t)$  прості, функція  $G(t)$  тотожно дорівнює нулю при  $t = 0$  (флуктуаційна ділянка), функція  $G(t)$  має один максимум і дві точки перегину (основна ділянка), функція  $G(t)$  має експонентну асимптотику при  $t \rightarrow \infty$  (периферійна ділянка). Вивчено інваріантні часові властивості огинаючої монохроматичних електромагнітних імпульсів, що реєструються після проходження крізь плоский шар розсіювального неоднорідного середовища, тобто властивостей, які залишаються незмінними в разі варіації параметрів середовища, зокрема розподілу концентрації центрів, що розсіюють.

Ключові слова: функції Гріна, монохроматичні електромагнітні імпульси, розсіювальне неоднорідне середовище, рівняння Ісімару, функція когерентності, форма результуючого імпульсу, інваріантна лагеррівська форма, чисельні експерименти.

## SIMULATION OF PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION IN AN INHOMOGENEOUS NONABSORBING MEDIUM

The paper presents analytical solutions of the parabolic Ishimaru equation for the electromagnetic field coherence function, which describe the temporal properties of a pulse at the output of an inhomogeneous non-dissipative scattering medium. An explicit expression for the Green's function of the problem is found. It is shown that the time part of the Green's function has an invariant Laguerre form. The results of numerical calculations of the shape of the studied time pulses at the exit of the span of the medium are also presented. The paper shows that the approach used in the Ishimaru model to describe the temporal evolution of the envelope of a monochromatic electromagnetic pulse in homogeneous non-dissipative scattering media can be developed for use in inhomogeneous non-dissipative media. An attempt was made to take into account the influence of the inhomogeneity of the medium on the shape of the resulting pulse. To solve the stated problem, it was necessary to overcome the difficulties associated with the calculation of the resulting path integral in the space of diffusion trajectories. This made it possible to obtain an explicit expression for the Green's function of the problem and construct a computational algorithm, on the basis of which a number of numerical experiments were carried out. The analysis of the results of the work was carried out on the basis of the apparatus of quadratic integral functionals based on the solutions of stochastic differential equations. From the theory of similar functionals, it is obtained that all poles of the Green's function  $G(t)$  are simple, the function  $G(t)$  is identically equal to zero at  $t = 0$  (fluctuation region), the function  $G(t)$  has one maximum and two inflection points (main region), the function  $G(t)$  has exponential asymptotics at  $t \rightarrow \infty$  (peripheral region). The paper studies the invariant temporal properties of the envelope of monochromatic electromagnetic pulses recorded after passing through a flat layer of a scattering inhomogeneous medium, i. e. properties that remain unchanged when the parameters of the medium vary, in particular, the distribution of the concentration of scattering centers.

Key words: Green's functions, monochromatic electromagnetic pulses, scattering inhomogeneous medium, Ishimaru equation, coherence function, resulting pulse shape, invariant Laguerre form, numerical experiments.

### Постановка проблеми

Нижче поставлено й розглянуто завдання про форму імпульсу, що поширюється в неоднорідному й непоглинаючому середовищі типу, що розсіює. У роботі як вихідний використано електромагнітний імпульс у вигляді  $\delta$ -функції щодо напрямку поширення. Таким чином, ідеться, по суті, про функцію Гріна розглянутого завдання. Імпульси проходять крізь шар товщини  $L$ , що містить розсіювальні центри з довільним профілем концентрації  $\rho(z)$  уздовж осі розповсюдження  $z$ , при цьому саме розсіювання вважається малокутовим [1; 2].

Під час розгляду прийнято такі припущення:

- вихідна (стартова хвиля) є плоскою;
- показники середовища, будучи змінними в просторі, є постійними в часі; ці характеристики покладатимуться відомими та заданими;
- просторові характеристики середовища азимутально симетричні щодо напрямку поширення випромінювання;
- розглянуте випромінювання являє собою монохроматичну хвилю з імпульсною огинаючою.

Третє припущення означає, що характеристики середовища змінюються шарами, паралельними до фронту вихідної плоскої хвилі. Нижче ми обмежимося цим припущенням, маючи на увазі отримання результатів принципового плану.

У роботі розглянуто часові властивості огинаючої монохроматичних електромагнітних імпульсів, що реєструються після проходження крізь плоский шар неоднорідного середовища, що розсіює. У цьому особливу увагу звернено на такі властивості, які можна назвати інваріантними, тобто на властивості, характерні для всіх аналізованих середовищ. Завдяки інформації про інваріантні властивості стає можливим додаткова перевірка відповідності досвідчених даних і їх інтерпретація, не пов'язана з конкретними параметрами середовища розповсюдження. Такі властивості передавальної функції, як позитивна визначеність, звернення в нуль на початку імпульсу та на його периферії, єдиність максимуму й наявність лише двох точок перегину, є якісними ознаками й легко ідентифікуються.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Задачу про функцію Гріна середовища, що містить центри, що розсіюють, можна зарахувати до класичних. Різні фізичні й обчислювальні аспекти цієї проблеми вже давно обговорюються в наукових фахових виданнях [1–6]. Рівняння, які описують поширення імпульсів, дуже складні, тому отримання повних аналітичних рішень поставленого завдання є питанням майбутнього. Як правило, у публікаціях наводяться точні вирази для перших статистичних моментів огинаючої імпульсу або деякі вирази, справедливі в рамках обраних наближень. Наявні ж точні аналітичні вирази представлені переважно у вигляді континуальних інтегралів і/або розкладів у нескінченні ряди. У тих роботах, де наведено аналітичне рішення завдання в явному вигляді, воно, як правило, належить до спрощених моделей. Для вирішення вихідних рівнянь використовують чисельні методи.

### Мета дослідження

Мета роботи полягає у вивченні інваріантних тимчасових властивостей огинаючої монохроматичних електромагнітних імпульсів, що реєструються після проходження крізь плоский шар розсіювального неоднорідного середовища, тобто властивостей, які залишаються незмінними в разі варіації параметрів середовища, зокрема розподілу концентрації центрів, що розсіюють. Особливу увагу приділено поздовжнім (часовим) розмірам результуючого імпульсу, що визначає його властивості.

### Виклад основного матеріалу дослідження

#### 1. Вихідні положення

Нижче поставлено й розглянуто завдання про форму імпульсу, що поширюється в неоднорідному та непоглинаючому середовищі типу, що розсіює. Обговоримо зазначені вище припущення й обмеження, що впливають із них, на ділянку застосування результуючих виразів. У лінійному наближенні вихідний  $I_{in}(t)$  та імпульс на виході із середовища  $I(t)$  пов'язані відомим виразом [1]:

$$I(t) = \int G(t-t') I_{in}(t') dt', \quad (1)$$

і за формою  $I_{in}(t)$  можна визначити  $I(t)$ , якщо визначена функція Гріна  $G(t-t')$ .

Перейдемо до формулювання вихідних рівнянь. Шукана функція Гріна є Фур'є-образом двохчастотної функції когерентності  $\Gamma$ :

$$G(t) = \frac{1}{2\pi} \int \Gamma(\omega_d) \exp(-i\omega_d t) d\omega_d. \quad (2)$$

Далі для функції  $\Gamma$  у фізичній ситуації, що розглядається, поширення плоскої електромагнітної хвилі в дифузійно-розсіювальному непоглинаючому середовищі маємо [1]:

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} + ia \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{r}^2} + b(z) \mathbf{r}^2 \right) \Gamma(z, \mathbf{r}; \omega_d) = 0. \quad (3)$$

Тут  $a = k_d / 2k^2$ ;  $k$  – хвильове число монохроматичної хвилі, що поширюється;  $k_d = \omega_d / c$ ;  $c$  – швидкість світла;

$$b(z) = (4\alpha_p)^{-1} \rho(z) \sigma_s(z) k^2, \quad (4)$$

де  $\rho(z)$  – концентрація розсіювальних центрів;  $\sigma_s(z)$  – переріз розсіювання;  $\alpha_p$  – кутовий параметр розсіювання, а як аргументи функції когерентності  $\Gamma$  вказані поздовжня координата поширення  $z$  й поперечний вектор  $\mathbf{r}$ .

Рівняння (3) є диференціальним рівнянням у часткових похідних параболічного типу з потенціалом квадратичного виду  $U(z, \mathbf{r}) = b(z) \mathbf{r}^2$ , крутість якого залежить від координати  $z$ , і початковою умовою  $\Gamma(z=0, \mathbf{r}) = 1$ , що забезпечує властивість функції Гріна  $G(t-t')|_{z=0} = \delta(t-t')$ .

Рівняння (3) належить до класу рівнянь Хілла й у загальному випадку його аналітичних розв'язків потенціалу  $U(z, \mathbf{r})$  довільного виду отримати не вдається. Істотним виявляється те, що з потенціалу квадратичного виду апроксимаційне рішення функції Гріна  $G(t)$  побудувати можливо.

#### 2. Рівняння для двохчастотної функції когерентності

Розглянемо шар, що розсіює, товщина якого (уздовж осі  $z$ ) дорівнює  $L$ . Розіб'ємо довжину  $L$  на  $N$  ділянок  $\{\Delta_n\}$ :  $L = \sum_{n=1}^N \Delta_n$ .

Нехай величини  $\rho(z)$  та  $\sigma_s(z)$  задані та є безперервними функціями  $z$ . Виберемо ділянки  $\Delta_n = z_n - z_{n-1}$ ,  $n = 1, \dots, N$  так, щоб передати всі істотні деталі потенціалу  $U(z, \mathbf{r})$ , і позначимо  $b_n = b(z_n)$ ,  $\rho_n = \rho(z_n)$  та  $\sigma_n = \sigma_s(z_n)$ . Маючи на увазі випадок  $N \gg 1$ , замінимо в потенціалі  $U(z, \mathbf{r})$  усі значення, що лежать усередині кожної  $n$ -ї ділянки,  $1 \leq n \leq N$ , на величину  $U(z_n, \mathbf{r})$ , де  $z_n = \sum_{m=1}^n \Delta_m$  – права межа ділянки.

Отриманий таким чином потенціал  $U(z, \mathbf{r})$ , що є кусково-постійною функцією від  $z$ , використовуватимемо нижче в апроксимаційному рівнянні (6). Тепер наблизимо рішення рівняння (3) функцією  $\Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d)$ , що є рішенням апроксимаційного рівняння зі шматково-постійним за  $z$  виразом  $U_N(z_n, \mathbf{r})$  для потенціалу  $U(z, \mathbf{r})$ :

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} + ia \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{r}^2} + U_N(z, \mathbf{r}) \right) \Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d) = 0, \quad (5)$$

з умовою  $\Gamma_N(0, \mathbf{r}; \omega_d) = 1$ . Якщо буде знайдено рішення рівняння (5) для  $\Gamma_N$ , то потрібна функція когерентності буде випливати з нього в межі при  $N \rightarrow \infty$ . Рівнянню (5) еквівалентна послідовність рівнянь:

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} + ia \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{r}^2} + U_N(z_n, \mathbf{r}) \right) \Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d) = 0, \quad n = 1, \dots, N, \tag{6}$$

рішення яких визначаються початковою умовою  $\Gamma_N(z = 0, \mathbf{r}; \omega_d) = 1$  і ланцюжком граничних умов:

$$y_{n+1}(z_n) = y_n(z_n), \quad n = 1, \dots, N, \tag{7}$$

де  $y_n(z)$  – функція  $\Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d)$  на  $n$ -й ділянці.

Перейдемо до вирішення розгорнутої системи рівнянь (6). Розглянемо із цією метою довільну  $n$ -у ділянку:

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} + ia \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{r}^2} + U_N(z_n, \mathbf{r}) \right) \Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d) = 0. \tag{8}$$

На цій ділянці потенціал  $U_N$  залежить від координати  $z_n$  як від параметра,  $U_N(z, \mathbf{r}) = b(z)\mathbf{r}^2 \equiv b_n \mathbf{r}^2$ , де  $b_n = (4\alpha_p)^{-1} \rho(z_n) \sigma_s(z_n) k^2$ . Таким чином, кожне з рівнянь (8) є параболічним рівнянням у часткових похідних зі шматково-постійним за  $z$  потенціалом. Шукатимемо розв’язок  $n$ -го рівняння на інтервалі  $(z_{n-1}, z_n)$  у вигляді:

$$\Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d) = \frac{1}{f(z)} \exp[g(z)\mathbf{r}^2]. \tag{9}$$

Ця форма шуканого розв’язка обумовлена параболічною властивістю потенціалу за  $\mathbf{r}$ . Із (8) і (9) випливають такі рівняння для введених функцій  $f(z)$  та  $g(z)$ :

$$-\frac{1}{f(z)} \frac{df(z)}{dz} + 4iag(z) = 0, \quad \frac{dg(z)}{dz} + 4iag^2(z) + b_n = 0. \tag{10}$$

Розглянемо спочатку друге рівняння із системи (10), що є стандартним рівнянням Ріккати. Нехай  $g = g(z_n)$ , тоді для всіх  $n$  розв’язання цього рівняння з початковою умовою  $g(z_{n-1}) = g_{n-1}$ , що випливає з (7), таке:

$$g(z) = \frac{g_{n-1} - (4ia/b_n)^{-1/2} \operatorname{tg}(\sqrt{4iab_n}(z - z_{n-1}))}{1 + (4ia/b_n)^{1/2} g_{n-1} \operatorname{tg}(\sqrt{4iab_n}(z - z_{n-1}))}, \tag{11}$$

а на його правому кінці:

$$g_n = \frac{g_{n-1} - (4ia/b_n)^{-1/2} \operatorname{tg}(\sqrt{4iab_n} \Delta_n)}{1 + (4ia/b_n)^{1/2} g_{n-1} \operatorname{tg}(\sqrt{4iab_n} \Delta_n)}. \tag{12}$$

У свою чергу, функція  $f(z)$  знаходиться з (9) за допомогою квадратури з початковою умовою  $f(z_{n-1}) = f_{n-1}$ , де  $f_{n-1}$  – значення функції на правому кінці попередньої  $(n - 1)$ -ї ділянки:

$$\frac{f(z)}{f_{n-1}} = \cos(\sqrt{4iab_n}(z - z_{n-1})) + \sqrt{4ia/b_n} g_{n-1} \sin(\sqrt{4iab_n}(z - z_{n-1})),$$

$$f_n = \left[ \cos(\sqrt{4iab_n} \Delta_n) + \sqrt{4ia/b_n} g_{n-1} \sin(\sqrt{4iab_n} \Delta_n) \right] f_{n-1}. \tag{13}$$

Отже, функція когерентності  $\Gamma_N(z, \mathbf{r}; \omega_d)$  при  $z = z_N = L$  дорівнює:

$$\Gamma_N(z_N, \mathbf{r}; \omega_d) = \frac{1}{f_N} \exp(g_N \mathbf{r}^2), \tag{14}$$

при цьому послідовності  $\{f_n\}$  і  $\{g_n\}$  визначаються з рекурентних співвідношень (11) і (12), а також початкових умов  $f_0(0) = 1$  і  $g_0(0) = 0$ . Зокрема, у точці прийому, коли  $\mathbf{r} = 0$  і  $z = L$ , маємо:

$$\Gamma_N(L, \mathbf{r}; \omega_d) = \frac{1}{f_N(z_N)}. \tag{15}$$

### 3. Функція Гріна

Нехай  $T_1$  – час поширення початкової точки імпульсу. Тоді функція імпульсного відгуку (функція Гріна) така:

$$G_N(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\omega_d(t-T_1))}{f_N(\omega, \omega_d)} d\omega_d, \quad (16)$$

при цьому у функції  $f_N = f_N(\omega, \omega_d)$  зазначена залежність як від різницевої частоти  $\omega_d$  (змінної інтегрування), так і від частоти  $\omega$  монохроматичного імпульсу. З рекурентного співвідношення (13) випливає:

$$f_N = \prod_{n=1}^{N-1} \left[ \cos(\sqrt{4iab_n \Delta_n}) + \sqrt{4ia/b_n} g_{n-1} \sin(\sqrt{4iab_n \Delta_n}) \right]. \quad (17)$$

Припустимо далі, що функція  $b(z)$  – гладка (різкі межі концентрації відсутні), тоді  $\text{tg}(\phi_n) = \left( \text{tg}(\phi_{n-1}) - \text{tg}(\sqrt{4iab_n \Delta_n}) \right) \left( 1 + \text{tg}(\phi_{n-1}) \text{tg}(\sqrt{4iab_n \Delta_n}) \right)^{-1}$ , де  $\text{tg}(\phi_n) = \sqrt{4ia/b_n} g_n$ . Це дає  $\phi_{n+1} = \phi_n - \sqrt{4ia/b_n} \Delta_n$ , що призводить до рівності  $\phi_N = -\sum_{n=1}^N \sqrt{4iab_n \Delta_n}$ , тому  $g_n = -\frac{1}{\sqrt{4ia/b_n}} \text{tg}\left(\sum_{j=1}^N \sqrt{4iab_j \Delta_j}\right)$ . Підставляючи цей вираз у співвідношення (14), послі-

довно знайдемо:

$$f_N = \cos\left(\sum_{n=1}^N \sqrt{4iab_n \Delta_n}\right). \quad (18)$$

Оскільки  $ab_n = (\rho_n \sigma_n \omega_d)(8\alpha_p c)^{-1}$ , де  $\rho_n = \rho(z_n)$  і  $\sigma_n = \sigma_s(z_n)$ , то для шуканої функції Гріна отримаємо:

$$G(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\omega_d(t-T_1))}{\cos\left(\sqrt{i\omega_d \sum_{n=1}^N \Delta_n \sqrt{(\rho_n \sigma_n)/(2\alpha_p c)}}\right)} d\omega_d. \quad (19)$$

Розглянемо вираз  $\tau^{1/2} = \sum_{n=1}^N \Delta_n \sqrt{(\rho_n \sigma_n)/(2\alpha_p c)}$ . Сума в його правій частині в межі  $N \rightarrow \infty$  перетворюється на інтеграл:

$$\tau^{1/2} = (2\alpha_p c)^{-1/2} \int_0^L \sqrt{\rho(z)\sigma_s(z)} dz, \quad (20)$$

що дає  $G(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-i\omega_d(t-T_1))}{\cos\sqrt{i\omega_d \tau}} d\omega_d$ . Використовуючи заміну  $\omega_d = is$ , отримаємо остаточно

шуканий вираз для функції Гріна, що формально збігається з відомим рішенням рівняння Ісімару [1; 2] для однорідних розсіювальних середовищ:

$$G(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{\exp[s(t-T_1)]}{\text{ch}\sqrt{s\tau}} ds. \quad (21)$$

Цей вираз залежить від двох параметрів  $T_1$  і  $\tau$ . Перший відповідає за час приходу імпульсу як цілого й дорівнює відношенню довжини шляху до швидкості світла  $c$ . Другий визначає розширення імпульсу. Наведемо ще одне представлення для функції Гріна:

$$G(t) = \frac{1}{2\pi i \tau} \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{\exp[\eta(t-T_1)/\tau]}{\text{ch}\sqrt{\eta}} d\eta. \quad (22)$$

Тут:

$$T_1 = L/c, \quad \tau = \frac{1}{2\alpha_p c} \left( \int_0^L \sqrt{\rho(z)\sigma(z)} dz \right)^2. \quad (23)$$

Отримані формули (22–23) відрізняються від відомого результату Ісімару [1; 2] тим, що вони справедливі для неоднорідних середовищ.



4. Фізична інтерпретація

Імпульсу із заданою часовою залежністю  $I_i(t)$  відповідатиме імпульс на виході із середовища, що описується виразом:

$$I(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} I_{in}(t') dt' \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{\exp[s(t-t'-T_1)]}{\text{ch} \sqrt{s\tau}} ds. \tag{24}$$

Нехай площину  $z = 0$  стартовий імпульс досяг у момент часу  $t = 0$ . Поширюючись у середовищі, що розсіює, він досягне площини  $z = L$  і в цьому місці матиме форму  $I(t)$ . Проаналізуємо параметри цього імпульсу. Із цією метою визначимо значення перших трьох моментів  $\langle t^n \rangle = \int_0^{\infty} t^n I(t) dt$ ,  $n = 0, 1, 2$ . При цьому приймемо, не обмежуючи спільності, що стартовий імпульс має запасену енергію за величиною чисельно рівну одиниці. Цікаві моменти будемо відраховувати від  $T_1$ :

$$\langle (t-t'-T_1)^n \rangle = (-1)^n \left. \frac{d^n}{ds^n} \frac{1}{\text{ch} \sqrt{s\tau}} \right|_{s=0}. \tag{25}$$

З урахуванням припущення про одиничну енергію стартового імпульсу при  $n = 0$  для нульовому моменту знайдемо  $\langle 1 \rangle_L = 1$ , що відповідає прийнятій моделі поширення випромінювання без поглинання. Далі з (25) отримаємо:

$$\langle (t-T_1) \rangle_L = \frac{1}{2} \tau + \langle t' \rangle_0, \tag{26}$$

звідки випливає, що середній за імпульсом момент його приходу дорівнює  $T_1 + \tau/2$  (з урахуванням першого моменту стартового імпульсу  $\langle t' \rangle_0$ ).

Зрештою, при  $n = 2$  знайдемо для середньої тривалості імпульсу  $\sqrt{D_L}$

$$D_L = \langle (t-T_1)^2 \rangle_L = \frac{1}{6} \tau^2 + D_0, \tag{27}$$

де  $\sqrt{D_0}$  – середня тривалість вихідного імпульсу. Таким чином, до дисперсії  $D_0$  додається величина  $\tau^2/6$ . Якщо вихідний імпульс як функція часу є  $\delta$ -функцією,  $I_i(t') = \delta(t')$ , то в результаті поширення в розсіювальному середовищі його середня тривалість становитиме:

$$\sqrt{D_L} = \tau/\sqrt{6} = \frac{1}{\sqrt{24\alpha_p c}} \left( \int_0^L \sqrt{\rho(z)\sigma_s(z)} dz \right)^2. \tag{28}$$

Отже, тривалість імпульсу відображає поздовжні варіації концентрації середовища, що розсіює. В окремому випадку однорідного вздовж осі  $z$  середовища, коли  $\rho(z)$  і  $\sigma(z)$  постійні, отримаємо:

$$\sqrt{D_L} = (\rho\sigma_s L^2)(\sqrt{24\alpha_p c})^{-1}, \tag{29}$$

тобто тут середня тривалість імпульсу зростає пропорційно квадрату прогонувої відстані [1].

Зважаючи на значне різноманіття варіантів параметрів середовища, що розсіює, чисельне моделювання проведемо, використовуючи відносні значення. Як робочу формулу використаємо таку:

$$I(t, L) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I_{in}(t') dt' \int_{-i\infty}^{i\infty} \frac{\exp[iu(t-t'-L/v)]}{\text{ch} \sqrt{i u \tau}} du, \tag{30}$$

де  $L$  – довжина пройденого шляху фронту зондуючого імпульсу до моменту  $t$ ,  $v$  – швидкість імпульсу, а сам імпульс виберемо з гаусівської форми:

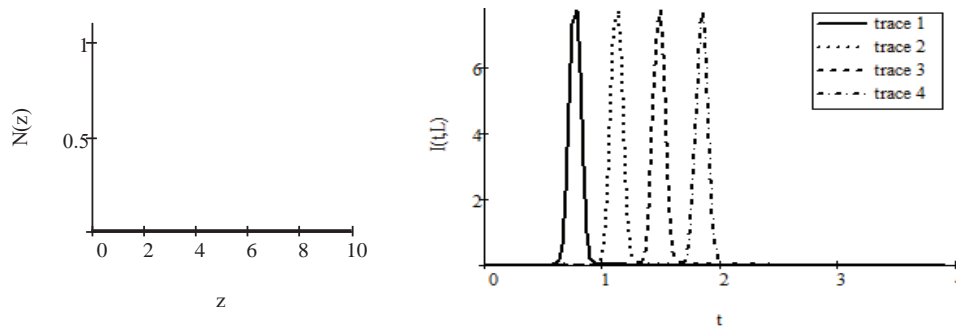
$$I_{in}(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2\tau^2}\right), \tag{31}$$

з дисперсією

$$\tau = \left( \int_0^L N(z) dz \right)^2, \tag{32}$$

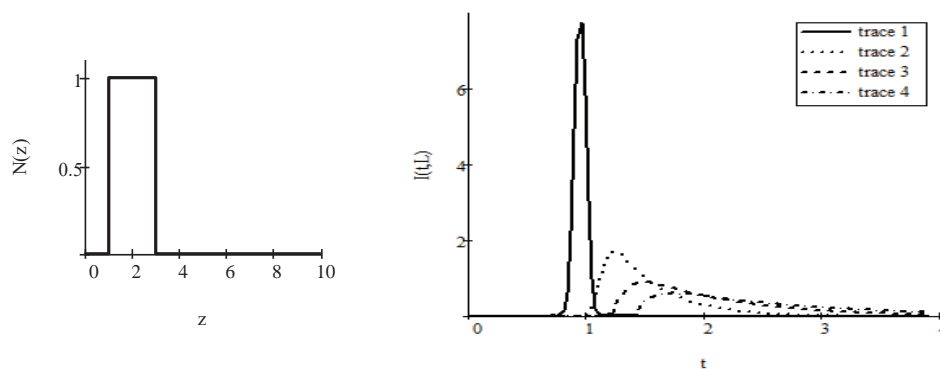
де  $N(z)$  – ефективна щільність центрів розсіювання середовища.

Виберемо форму зондуєчого імпульсу гаусівською (31), що має дисперсію  $\tau = 0,05$  і поширюється зі швидкістю  $v = 0,09$ . На рис. 1 на інтервалі  $1 \leq z \leq 4$  показано приклад утворення 4 шлейфів розсіяної хвилі на вибраних відстанях ( $L = 0,9, 2,1, 3,3, 4,5$ ) у разі відсутності розсіювальних центрів (згори) й у разі їх наявності на відстанях ( $L = 1,5, 1,8, 2,1, 2,4$ ) (знизу). У другому випадку видно динаміку формування шлейфів розсіяної хвилі, у яких хвостова частина розташована в периферійній ділянці часу  $t$ .



Сімейство тимчасових імпульсів  $I(t, L)$ ;

Профіль зони розсіювання  $L=0,9$  (лінія),  $L=2,1$  (крапки),  $L=3,3$  (тире),  
 $L=4,5$  (пунктир)



Сімейство тимчасових імпульсів  $I(t, L)$ ;

Профіль зони розсіювання  $L=1,5$  (лінія),  $L=1,8$  (крапки),  $L=2,1$  (тире),  
 $L=2,4$  (пунктир)

Рис. 1. Зверху – випадок відсутності центрів, що розсіюють,  
знизу – розсіювальне середовище на інтервалі  $1 \leq z \leq 4$

З сімейства кривих  $I(t, L)$ , наведених унизу на рис. 1, видно, що вони мають лагерівську властивість [6; 7], а саме: функція  $I(t, L)$  тотожно дорівнює нулю при  $t = 0$  (флуктуаційна ділянка), функція  $I(t, L)$  має один максимум і дві точки перегину (основна ділянка), функція  $I(t, L)$  має експонентну асимптотику при  $t \rightarrow \infty$  (периферійна ділянка).

З формул (22) – (23) видно, що можливий розгляд різних видів залежності концентрації та перерізу розсіювання від поточної координати  $z$ .

### Висновки

На закінчення відзначимо, що розвитком запропонованого апроксимаційного підходу стосовно процесів, які впливають на часове затягування електромагнітних імпульсів, може бути врахування згасання випромінювання в разі його поширення в неоднорідному поглинаючому

середовищі [4]. Математичною основою при цьому послугує врахування в параболічному рівнянні (3) доданка, пов'язаного з поглинанням, при цьому коефіцієнти рівняння можуть залежати від поздовжньої координати. Зазначимо також, що аналіз еволюції форми тимчасового імпульсу в разі його поширення дає можливість судити про просторовий розподіл характеристик розсіювального середовища вздовж осі розповсюдження.

#### Список використаної літератури

1. Ishimaru A. Theory and Application of Wave Propagation and Scattering in Random Media. *Proc. IEEE*. 1977. Vol. 65. P. 1030–106.
2. Ishimaru A. Propagation and scattering of waves in randomly inhomogeneous media. 1997. Vol. 2.
3. Flatte S.M. Wave Propagation Through Random Media: Contributions from Ocean Acoustics. 1983. *Proc. IEEE*. Vol. 71. P. 1267–1294.
4. Галуза А.А., Мазманішвілі А.С. Форма імпульса, розпространяючогося в неоднорідній непоглощаючій середі. *Радиофизика и Радиоастрономия*. 1997. Vol. 2. P. 353–358.
5. Helstrom K. Quantum Theory of Hypothesis Testing and Estimation. 1979. 344 p.
6. Feller W. An Introduction to Probability Theory and its Applications. N-Y. : John Wiley & Sons, 1970.

#### References

1. Ishimaru, A. (1977). Theory and Application of Wave Propagation and Scattering in Random Media. *Proc. IEEE*. Vol. 65. P. 1030–1061.
2. Ishimaru, A. (1997). Propagation and scattering of waves in randomly inhomogeneous media. *IEEE Press, Piscataway*. Vol. 2.
3. Flatte, S.M. (1983). Wave Propagation Through Random Media: Contributions from Ocean Acoustics. *Proc. IEEE*. Vol. 71. P. 1267–1294.
4. Galuza, A.A. & Mazmanishvili, A.S. (1997). Shape of a pulse propagating from an inhomogeneous non-absorbing medium. *Radiophysics and Radioastronomy*. Vol. 2. P. 353–358.
5. Helstrom, K. (1979). Quantum Theory of Hypothesis Testing and Estimation. 344 p.
6. Feller, W. (1970). An Introduction to Probability Theory and its Applications. N-Y. : John Wiley & Sons.

Мазманішвілі Олександр Сергійович – д.ф.-м.н., професор, старший науковий співробітник Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», e-mail: mazmanishvili@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0373-0626.

Mazmanishvili Oleksandr Serhiiiovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Senior Researcher at the National Science Center “Kharkiv Physical-Technical Institute”, e-mail: mazmanishvili@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0373-0626.

Д.В. МОСЬПАН, О.О. ЮРКО  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

## ПОБУДОВА ТА МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗАГОТОВКИ

*У роботі розглянута можливість автоматизації одного з ключових елементів технологічного процесу виготовлення листових товстостінних деталей із рифтами методом штамповки, а саме транспортування й позиціонування заготовки. Автоматизація процесу виготовлення товстостінних деталей, у тому числі й одержуваних за допомогою процесів вільного формоутворення, з конструкційних і спеціальних сталей є актуальним завданням сучасного машинобудування. Склад і послідовність основних операцій узагальненого технологічного процесу автоматизованого виготовлення таких деталей є відомими, можуть мати декілька класичних рішень, але очевидно, що ключовим моментом є етап виготовлення деталі із заготовки, оскільки можливість його автоматизації та керування ним у реальному часі є вирішальною ланкою системи автоматизації всього процесу загалом. Таке бачення щодо вирішення зазначеного питання та його подальше дослідження й моделювання в умовах наявного обладнання реальних вітчизняних виробництв, що залишилися тепер у робочому стані, дало можливість побудови запропонованої структури автоматизованої системи позиціонування заготовки.*

*Запропонована структура системи автоматизованого переміщення й позиціонування заготовки та виготовленої деталі на всіх етапах технологічного процесу її виготовлення, який базується на застосуванні рольгангу без приводу. Розроблена функціональна схема й алгоритм роботи авторизованої системи транспортування та позиціонування заготовки, проведено її моделювання в середовищі Labview. Результати моделювання виявили можливість реалізації процесу за допомогою гравітаційного рольгангу без приводу з рушієм, який здійснює переміщення заготовки. Створений віртуальний прилад для моделювання процесу переміщення об'єкту вздовж робочого поля з контролюванням його положення за допомогою дискретних датчиків, довів можливість підібрати раціональні величини заданих швидкостей на різних ділянках для усунення небажаних перехідних процесів і мінімізації часу доставки об'єкта до заданої ділянки робочого поля.*

*Ключові слова: системи автоматичного керування технологічним процесом, моделювання, вільне формоутворення, листове штампування.*

D.V. MOSPAN, O.O. YURKO  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

## CONSTRUCTION AND SIMULATION OF THE AUTOMATED BILLET POSITIONING SYSTEM

*This work considers the possibility of automating one of the key elements of the technological process of manufacturing thick-walled sheet parts with rifts by the stamping method, namely, transportation and positioning of the workpiece. Automation of the manufacturing process of thick-sheet parts, including those obtained by means of free forming processes, from structural and special steels, is an urgent task of modern mechanical engineering. The composition and sequence of the main operations of the generalized technological process of automated manufacturing of such parts is known and may have several classic solutions, but it is obvious that the key point is the stage of manufacturing the part from the blank, since the possibility of its automation and its control in real time is a crucial link of the automation system of everything process as a whole. Such a vision regarding the solution of the mentioned question and its further research and modeling in the conditions of the existing equipment of real domestic productions, which remained for the time being in working condition, made it possible to build the proposed structure of the automated workpiece positioning system.*

*The proposed structure of the system of automated movement and positioning of the workpiece and the manufactured part at all stages of the technological process of its manufacture, which is based on the use of a roller conveyor without a drive. The functional scheme and algorithm of work of the authorized system of transportation and positioning of the workpiece were developed, and its simulation was carried out in the Labview environment. The simulation results showed the possibility of implementing the process using a gravity roller conveyor without a driver that moves the workpiece. The created virtual device for simulating the process of moving an object along the working field with monitoring its position with the help of discrete sensors proved the possibility of choosing rational values of specified speeds in different sections to eliminate unwanted transient processes and minimize the time of delivery of the object to a given section of the working place.*

*Key words: systems of automatic control of the technological process, modeling, free forming, sheet stamping.*

### **Постановка проблеми**

Сучасне машинобудування характеризується безперервним ускладненням виробів, зростанням вимог щодо їх надійності, якості й техніко-економічних показників. У номенклатурі листових деталей, які виготовляються вагобудівними та автомобільними підприємствами, у зв'язку з виробництвом броньованої техніки виникла значна потреба в товстолістових деталях, виготовлених із конструкційних і спеціальних сталей. Значна частина таких деталей має елементи жорсткості. Запровадження виробництва цих деталей стикнулося з низкою складнощів, пов'язаних із нестійкістю процесу формоутворення, недостатністю в наявного обладнання зусилля штамповки, утворення гофру й порушення суцільності матеріалу заготовки під час деформації.

Засвоєння виробництва нової номенклатури деталей потребує в найкоротші терміни створення науково обґрунтованих рекомендацій щодо проектування технологічних процесів, штамів, оснастки й інструментів. Одним із ефективних шляхів вирішення означених завдань є автоматизація як окремих складників технологічного процесу, так і всього процесу загалом. Тому питання автоматизації технологічного процесу виготовлення товстостінних деталей із рифтами методом штампування є актуальним.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

У роботах [1; 2] представлено в першому наближенні склад і послідовність основних операцій узагальненого технологічного процесу автоматизованого виготовлення таких деталей. Значне місце в цьому процесі належить операціям транспортування й позиціонування заготовок. Причому за результатами розгляду технологічних і механічних особливостей виготовлення таких деталей, представлених у працях [3; 4], усі означені операції виконувалися вручну. Очевидно, що впровадження автоматичної системи, яка б дала змогу здійснювати синхронізоване переміщення та позиціонування заготовок і виготовлених деталей на всіх етапах процесу (включаючи вхідний і вихідний контроль параметрів заготовки й виготовленої деталі), суттєво поліпшило б швидкість і якість функціонування виробництва.

### **Мета дослідження**

Метою роботи є розгляд структури системи автоматизованого переміщення та позиціонування заготовки й виготовленої деталі на всіх етапах технологічного процесу її виготовлення, який базується на застосуванні рольгангу без приводу.

Для досягнення мети пропонується вирішити наступні завдання:

- розробити функціональну схему системи переміщення та позиціонування заготовки (деталі);
- розробити алгоритм і технологічну послідовність дій під час реалізації процесу переміщення та позиціонування заготовки на рольганговій системі без приводу.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Процес транспортування заготовок (деталей) за допомогою рольгангу є добре відомим і не потребує додаткових коментарів. У цьому разі йдеться про застосування гравітаційного рольгангу (без приводу), рух заготовки вздовж якого із заданою швидкістю (прискоренням) забезпечується зовнішнім рушієм. Позиціонування заготовки здійснюється за допомогою напрямних, установлених перед входом у робочу зону й оптично-електронних датчиків контролю розміщення заготовки в робочій зоні.

На рис. 1 представлена функціональна схема пропонованої системи переміщення та позиціонування заготовки на ділянці формоутворення деталі (на матриці штампу 3).

Алгоритм роботи системи, побудованої за синтезованою функціональною схемою, подано на рис. 2.

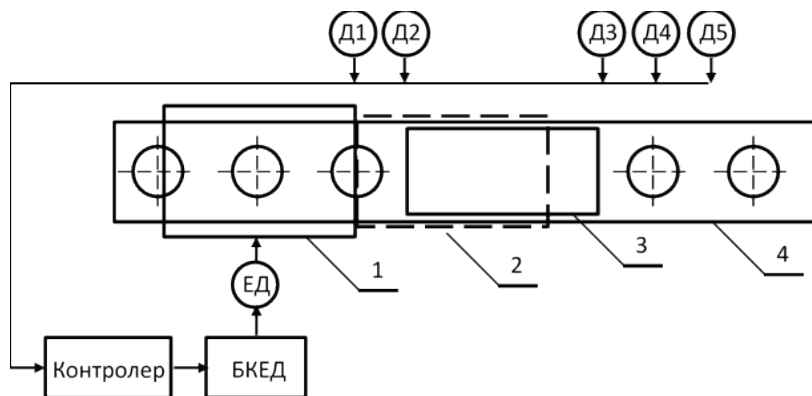


Рис. 1. Функціональна схема: 1 – рушій; 2 – заготовка; 3 – матриця; 4 – рольганг; Д1, Д2, Д3, Д4 – оптично-електронні датчики положення; Д5 – датчик тиску системи «виштовхування» деталі з матриці; ЕД – електричний двигун рушій; БКЕД – блок керування ЕД

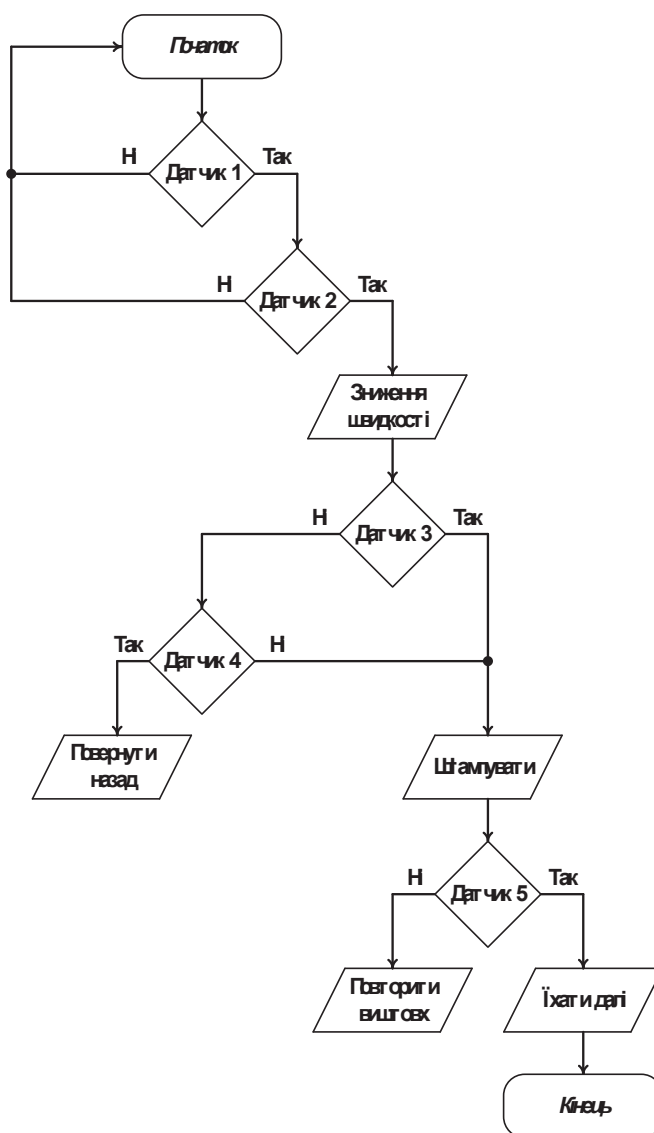


Рис. 2. Алгоритм роботи системи переміщення та позиціонування заготовки (деталі)

Датчик Д1 сигналізує про наявність заготовки в початковій позиції руху. Коли спрацює датчик Д2, блок керування електричним двигуном рушій 1 (БКЕД) (рис. 1) починає

зменшувати швидкість переміщення заготовки 2 у зону формоутворення (до матриці 3). Закон означеної зміни визначається контролером, виходячи з умов забезпечення оптимального позиціонування заготовки в робочій зоні. Після спрацьовування датчика Д3 подається команда на запуск штампу (тобто на переміщення пуансону і здійснення процесу формоутворення деталі). Датчик Д4 є необхідним для забезпечення можливості повернення заготовки до робочої зони в разі її проходження далі, ніж це передбачається технологічним циклом. Датчик Д5 формує сигнал про виштовхування готової деталі з матриці після завершення процесу формоутворення, що забезпечує можливість її подальшого переміщення рольгангом за допомогою рушія.

На рис. 3 показано технологічний цикл виготовлення деталі у вигляді швидкості переміщення заготовки рольгангом від часу. Фактично, рис. 3 віддзеркалює тахограму роботи електродвигуна ЕД (рис. 1). Для простоти ілюстрації процесу прийнято, що швидкість за сигналом датчика Д2 зменшуватиметься стрибком у два рази.

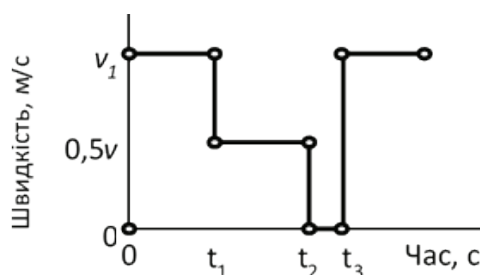


Рис. 3. Тахограма роботи електроприводу переміщення заготовки по рольгангу

Згідно з тахограмою (рис. 3), у проміжок часу з 0  $t_1$  заготовка переміщується зі швидкістю  $v_1$ . У момент часу  $t_1$  спрацьовує датчик Д2 і швидкість стрибком змінюється до  $0,5v_1$ , забезпечуючи можливість точнішого позиціонування заготовки в робочій зоні (матриці). Для цього електропривод рушія, який відповідає за переміщення заготовок уздовж рольгангу й виконується на основі асинхронного електричного двигуна ЕД, повинен працювати під керуванням векторного перетворювача частоти [5].

Проведемо спрощене моделювання об'єкта керування (рис. 4). Якщо на об'єкт масою  $m$  діє зовнішня сила  $F$ , то маємо прискорення  $a_m = F / m$ . На початку руху об'єкт набирає швидкість ( $v < v_z$  – менше заданої величини), сила збігається з напрямом руху об'єкта й величина прискорення буде додатною ( $a = +a_m$ ). Коли об'єкт набере задану швидкість ( $v = v_z = const$ ), то, нехтуючи тертям ковзання, матимемо  $a=0$ , тобто об'єкт рухається за інерцією з постійною швидкістю [5]. Оскільки під час моделювання час змінюється з деяким кроком  $dt$ , то крок зміни швидкості становитиме  $dv = a \cdot dt$  і критерієм набору швидкості буде виконання такої умови:

$$-a_T \cdot dt / 2 \leq (v - v_z) \leq a_T \cdot dt / 2.$$

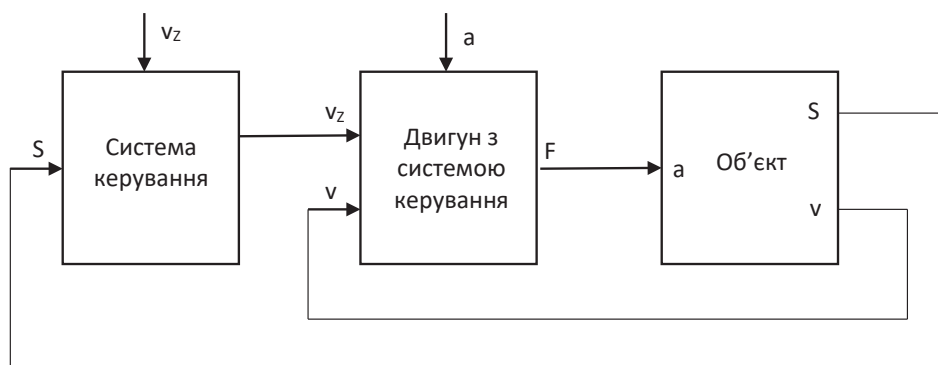


Рис. 4. Структурна схема віртуального приладу

Коли об’єкт перевищить задану швидкість ( $v > v_z$ ), то зовнішня сила  $F$  буде виконувати гальмівну дію й величина прискорення буде від’ємною ( $a = -a_m$ ).

Тобто формула закону зміни прискорення матиме такий вигляд:

$$a = \begin{cases} a_T, & \text{якщо } (v - v_z) < 0; \\ 0, & \text{якщо } -a_T \cdot dt / 2 \leq (v - v_z) \leq a_T \cdot dt / 2; \\ -a_T, & \text{якщо } (v - v_z) > 0. \end{cases}$$

Реалізацію цих умов залежності величини прискорення об’єкта від значення поточної швидкості в середовищі Labview виконаємо за допомогою двох вкладених структур Case Structure (рис. 5).

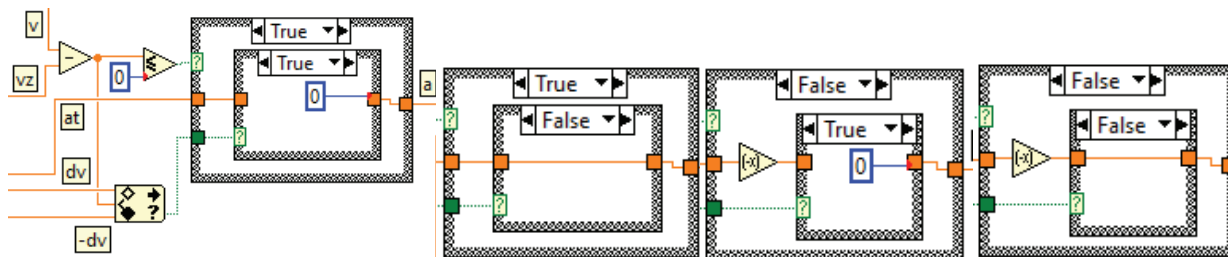


Рис. 5. Завдання величини прискорення

Величину переміщення та швидкості будемо розраховувати за відомими формулами кінематики:

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad v = v_0 + at,$$

де  $t = dt$ ,  $s_0$  та  $v_0$  – попередні значення ітерацій шляху та швидкості умовного циклу. Розрахунок за формулами реалізовано за допомогою структури Formula node (рис. 6).

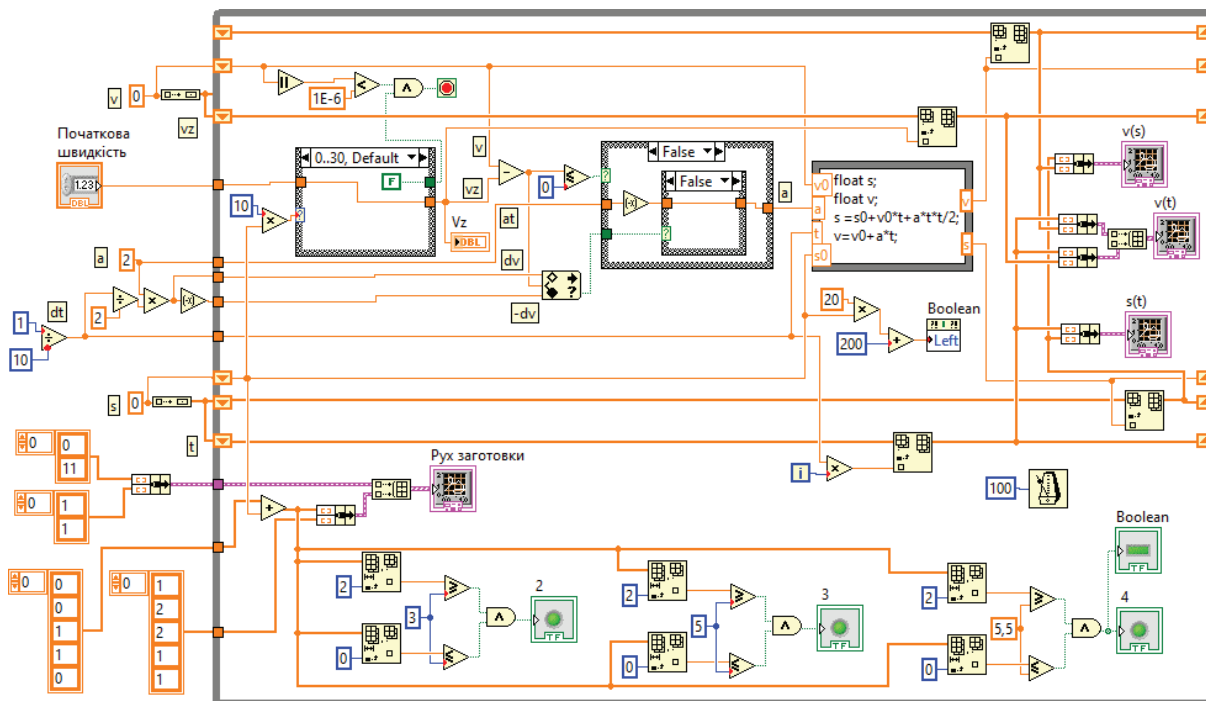


Рис. 6. Блок-діаграма віртуального пристрою

Величина заданої швидкості  $v_z$  залежить від пройденого шляху, що контролюється чотирма датчиками, які знаходяться в контрольних точках. Визначена послідовність спрацювання



датчиків за заданим алгоритмом, що знаходиться в пристрої керування, змінює значення заданої швидкості [6]. Маємо такі етапи:

- у разі спрацювання першого датчика об’єкт починає рух, поступово набирає швидкість до величини  $v_{z1}$  з прискоренням  $a$ . Обмеженням є спрацювання другого датчика, який знаходиться на відстані  $s_1$ ;
- у разі спрацювання другого датчика об’єкт зменшує швидкість, рухаючись за інерцією, до величини  $v_{z2}$ ;
- у місці зупину розташований датчик 3 на відстані  $s_2$ ;
- датчик 4 розміщується за датчиком 3 на відстані  $s_3$  і сигналізує про просування об’єкта далі запланованого місця. При цьому задана швидкість змінює напрям до величини  $(-v_{z3})$ .

Залежність заданої швидкості від відстані буде мати вигляд:

$$v_z = \begin{cases} v_{z1}, & \text{якщо } 0 \leq s < s_1; \\ v_{z2}, & \text{якщо } s_1 < s \leq s_2; \\ 0, & \text{якщо } s_2 < s \leq s_3; \\ -v_{z3}, & \text{якщо } s_3 < s. \end{cases}$$

Реалізацію цих умов залежності заданої швидкості від відстані в середовищі Labview виконаємо за допомогою структури Case Structure, у якій створено чотири вікна з указаними числовими діапазонами (рис. 7). Межі діапазонів визначають місця розташування датчиків на шляху об’єкта [7]. Уважається, що об’єкт буде встановленим на задане місце, якщо спрацював датчик 3 за неактивного датчика 4 і швидкість руху об’єкта дорівнює 0.

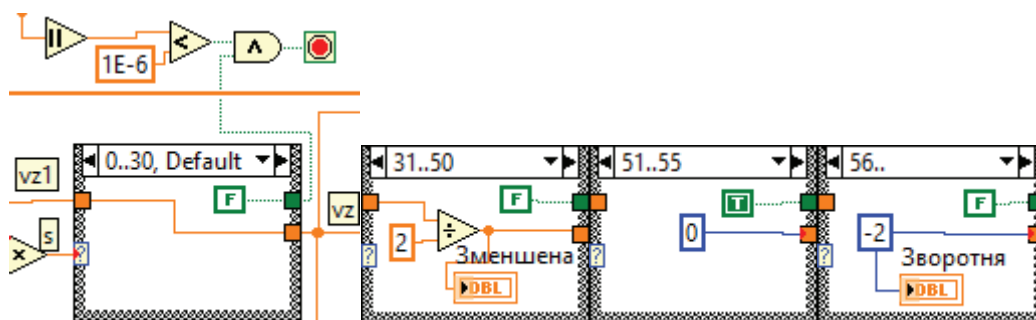


Рис. 7. Залежність заданої швидкості від відстані й умови зупинки віртуального приладу

Візуалізація руху об’єкта виконана за допомогою XY Graph, на якому об’єкт символічно зображено у вигляді прямокутника, що рухається повз датчики-індикатори, які розташовані на необхідних відстанях. У разі спрацювання датчика індикатор змінює свій колір на зелений. На полі графіка також розташований числовий індикатор, який динамічно відображає величину заданої швидкості (рис. 8).

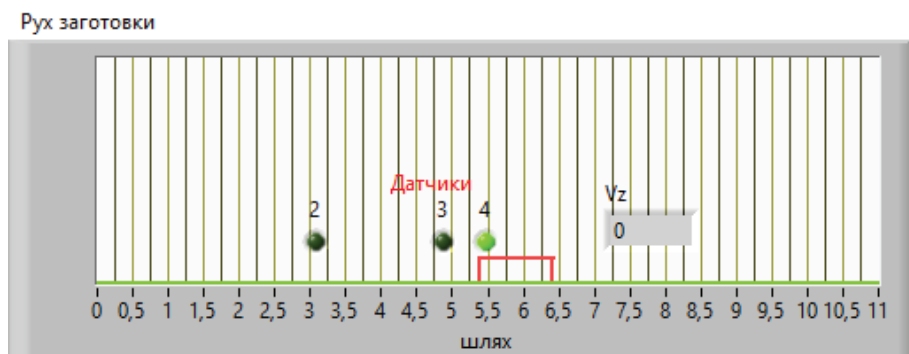


Рис. 8. Візуалізація руху об’єкта

Також реалізовано динамічне відображення в часі графічних залежностей швидкості й переміщення об'єкта. Для більш наглядного графічного представлення напрямку руху об'єкта також будується залежність швидкості від пройденого шляху (рис. 9).

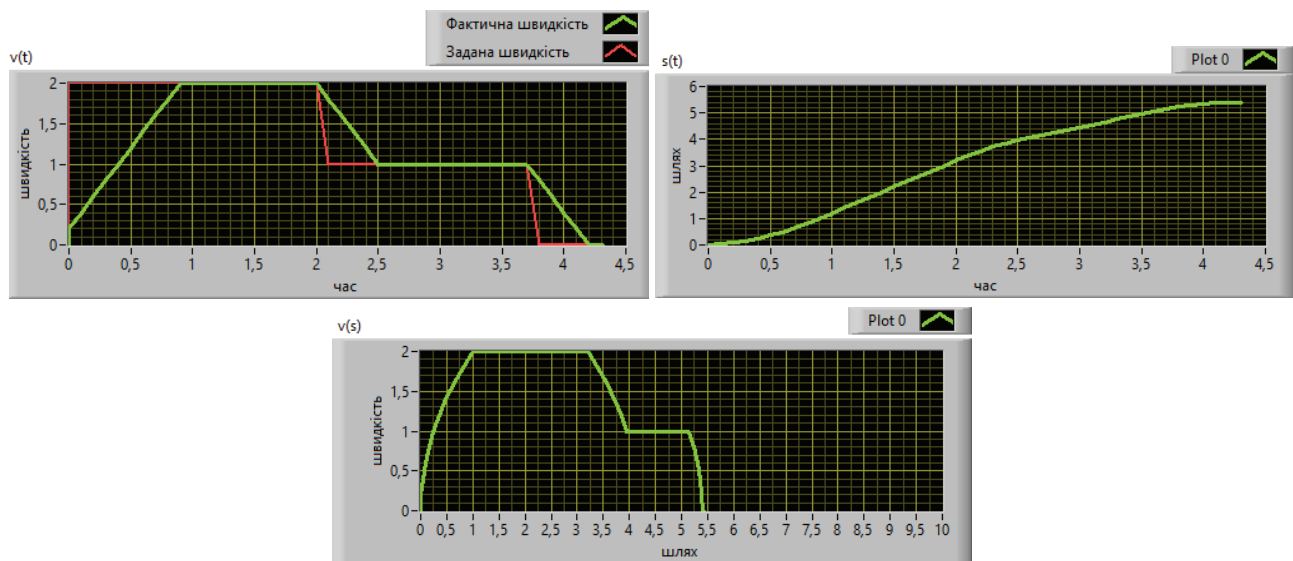


Рис. 9. Динамічне відображення в часі графічних залежностей  $v(t)$ ,  $s(t)$  та  $v(s)$

Загальний вигляд лицьової панелі користувача створеного віртуального приладу наведено на рис. 10.

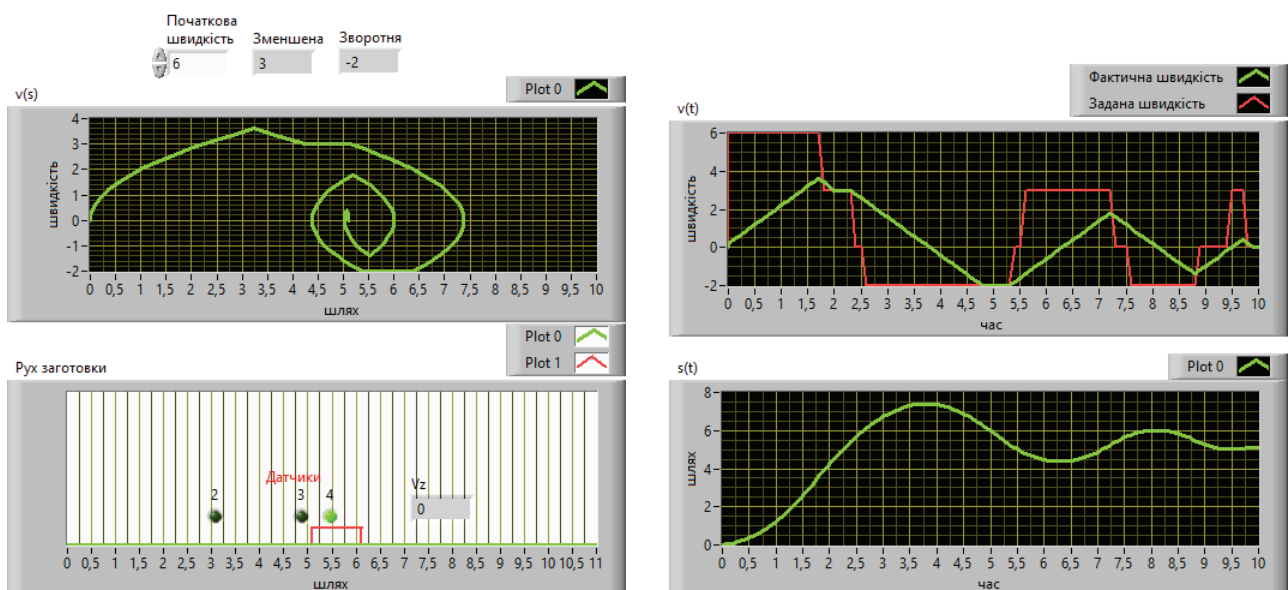


Рис. 10. Лицьова панель користувача

### Висновки

У роботі розглянуто структуру системи автоматизованого переміщення та позиціонування заготовки й виготовленої деталі на всіх етапах технологічного процесу її виготовлення. У процесі виконання сформованої мети роботи розроблено функціональну схему системи переміщення та позиціонування заготовки, алгоритм і технологічну послідовність дій під час реалізації процесу переміщення та позиціонування заготовки на рольганговій системі без приводу. Також створено віртуальний прилад для моделювання процесу переміщення об'єкта вздовж

робочого поля з контролюванням його положення за допомогою дискретних датчиків, який дає змогу підібрати раціональні величини заданих швидкостей на різних ділянках для усунення небажаних перехідних процесів і мінімізації часу доставки об'єкта до заданої ділянки робочого поля.

### Список використаної літератури

1. До визначення параметрів системи автоматичного керування технологічним процесом вільного формоутворення / Д.В. Моспан та ін. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук : КрНУ, 2022. Вип. 3–4 (59). С. 64–69. DOI: 10.30929/2072-2052.2022.3-4.59.64-69
2. Моспан Д.В. Автоматизація технологічного процесу формоутворення деталей з прямолінійними рифтами. *Сучасний стан наукових досліджень і технологій в промисловості*. Харків, 2023. Вип. 2(24). С. 150–158.
3. Черниш А.А. Удосконалення технології формування великогабаритних товстолистових деталей з елементами жорсткості з обмеженням осередку деформації : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05. Кременчук, 2017. 164 с.
4. New Solution For Plastic Deformation Process Intensification / D. Mospan et al. *Metallurgist*. 2022. Vol. 65. Issue 11–12. P. 1108–1116. DOI: 10.1007/s11015-022-01253-x
5. Моспан Д.В., Невлюдов І.Ш., Роменський В.І. До питань адаптації математичних моделей для систем управління технологічним процесом холодного листового штампування. *Технологія приборостроєння*. Харків, 2020. № 1. С. 3–7.
6. Mospan D., Nevliudov I., Sychova O., Novoselov S. Multithreaded Software Control Of Industrial Manipulator Movement. *Modern electrical and energy systems / Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, October 20–22*. Kremenchuk, 2022. P. 319–325. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005675
7. Development of a method for determining the optimal control trajectory for the periodic processes / D. Mospan et al. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. Vol. 3. P. 59–68. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00900

### References

1. Mospan, D.V., Nevliudov, I.S., Dragobetskii, V.V., & Kostin, V.V. (2022). To determine the parameters of the automatic control system of the technological process of free molding – [To determine the parameters of the automatic control system of the technological process of free molding]. *Electromechanical and energy-saving systems*. Vol. 3–4(59). P. 64–69. DOI: 10.30929/2072-2052.2022.3-4.59.64-69 [in Ukrainian]
2. Mospan, D.V. (2023). Automation of the technological process of forming parts with rectilinear rifts – [Automation of the technological process of forming parts with rectilinear rifts]. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. Vol. 3(25). P. 150–158. [in Ukrainian]
3. Chernysh, A.A. (2017). Udoskonalennia tekhnolohii formuvannia velykohabarytnykh tovstolystovykh detalei z elementamy zhorskosti z obmezheniam oseredku deformatsii – [Improvement of the technology of forming large-sized thick sheet parts with roughness elements with limitation of the center of deformation] : Candidate's thesis. Kremenchuk. 164 p. [in Ukrainian]
4. Mospan, D., Dragobetskii, V., Shapoval, A., Shchetynin, V., Agrat, R. & Shlyk, S. et al. (2022). New Solution For Plastic Deformation Process Intensification. *Metallurgist*. Vol. 65. Iss. 11–12. P. 1108–1116. DOI: 10.1007/s11015-022-01253-x [in English]
5. Mospan D.V., Nevliudov I.S. & Romenskiy V.I. (2020). Do pytan adaptatsii matematychnykh modelei dlia system upravlinnia tekhnolohichnym protsesom kholodnoho lystovoho shtampuvannia – [To the issues of adaptation of mathematical models for control systems of the technological process of cold sheet stamping]. *Technology of Instrumentation*. Vol. 1. P. 3–7. [in Ukrainian]

6. Mospan, D., Nevludov, I., Sychova, O. & Novoselov, S. (2022). Multithreaded Software Control Of Industrial Manipulator Movement. *International Conference MODERN ELECTRICAL AND ENERGY SYSTEMS / Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, October 20–22*. P. 319–325. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005675 [in English]
7. Mospan, D., Lutsenko, I., Oksanych, A., Oksanych, I., Fomovskaya, O. & Serdiuk, O. (2019). Development of a method for determining the optimal control trajectory for the periodic processes. *EUREKA: Physics and Engineering*. Vol. 3. P. 59–68. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00900

Моспан Денис Владиславович – к.т.н., доцент кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, e-mail: denis.mospan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5473-7874.

Юрко Олексій Олексійович – к.т.н., доцент кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, e-mail: yurkoalexe@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8244-2376.

Mospan Denys Vladyslavovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Engineering and Electronics of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: denis.mospan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5473-7874.

Yurko Oleksii Oleksiiiovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Engineering and Electronics of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, e-mail: yurkoalexe@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8244-2376.

УДК 519.873

А.В. НЕВЗОРОВ, О.В. СКЛЯРЕНКО, Я.О. КОЛОДІНСЬКА, Р.О. ЯРОВИЙ  
 Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

## ОСОБЛИВОСТІ АНАЛІТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ОБЛАДНАННЯ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

*До пріоритетних завдань науково-технічного характеру, вирішення яких створює умови для вдосконалення процесу експлуатації складних технічних систем та обладнання, належать такі: упровадження сучасних апаратних засобів, методів і програмно-алгоритмічного забезпечення параметричного контролю й діагностування обладнання, засобів і відпрацьованих технологій застосування методів неруйнівного контролю елементів (агрегатів), у яких у процесі експлуатації виникають відмови. Вирішення цих завдань потребує застосування аналітичних, статистичних та інших методів і підходів для визначення й оцінювання показників надійності систем. Саме дослідженню питань аналітичного забезпечення експлуатації складних, зокрема інформаційних, систем і технічного обладнання присвячена стаття.*

*У статті визначено особливості аналітичного забезпечення експлуатації інформаційних систем і технічного обладнання в умовах сучасних викликів, наведено визначення показників надійності й оцінювання рівня безвідмовності складних технічних об'єктів. Аналіз наукових праць за цією темою виявив, що наразі недостатньо досліджені й відсутні чітко обґрунтовані рекомендації щодо врахування впливу на величину статистичного оцінювання показника надійності виробу календарного терміну його експлуатації поряд із наробітком. Авторами запропоновано науковий підхід, який дає змогу здійснити якісне оцінювання рівня надійності щодо попередніх періодів експлуатації. При цьому не враховується вплив на статистичне оцінювання показника інтенсивності експлуатації. Статистичні дані про відмови та несправності отримуються за нестабільних умов спостережень, що значно впливає на точність і достовірність оцінювання. Одним із часткових завдань дослідження є вдосконалення методики статистичного контролю надійності агрегатів технічного обладнання з урахуванням впливу інтенсивності експлуатації та нестабільних умов спостережень.*

*Ключові слова: експлуатація, діагностування, надійність систем, контроль параметрів, показники надійності.*

A.V. NEVZOROV, O.V. SKLIARENKO, Ya.O. KOLODINSKA, R.O. YAROVYI  
 Private Higher Educational Establishment "European University"

## FEATURES ANALYTICAL SUPPORT OPERATING EQUIPMENT IN MODERN CONDITIONS

*The priority tasks of a scientific and technical nature, the solution of which creates conditions for improving the process of operation of complex technical systems and equipment, include: the introduction of modern hardware, methods and software and algorithmic support for parametric control and diagnostics of equipment, means and proven technologies for the application of methods of non-destructive control of elements (units) that fail during operation. Solving these tasks requires the use of analytical, statistical, and other methods and approaches for determining and evaluating system reliability indicators. This article is devoted to the study of analytical support for the operation of complex, in particular, information systems and technical equipment.*

*The article defines the features of analytical support for the operation of information systems and technical equipment in the conditions of modern challenges, provides the definition of reliability indicators and evaluation of the level of failure of complex technical objects. The conducted analysis of scientific works on this topic revealed that currently there are insufficiently researched and there are no well-grounded recommendations on considering the impact on the value of the statistical assessment of the product reliability indicator of the calendar term of its operation along with the earnings. The authors proposed a scientific approach that allows a qualitative assessment of the level of reliability in relation to previous periods of operation. At the same time, the impact on the statistical evaluation of the exploitation intensity indicator is not considered. Statistics on failures and malfunctions are obtained under unstable observation conditions, which significantly affects the accuracy and reliability of the assessment. One of the partial tasks of the research is to improve the methodology of statistical control of the reliability of technical equipment units, considering the influence of the intensity of operation and unstable observation conditions.*

*Key words: maintenance, diagnostics, reliability of systems, control parameter, reliability indicators.*

### Постановка проблеми

Серед важливих завдань удосконалення експлуатації та оцінювання рівня безвідмовності складних об'єктів за технічним станом є вдосконалення системи збирання, обробки й аналізу інформації про технічний стан і надійність обладнання.

Своєчасне виявлення моментів виникнення деградаційних процесів, що визначають терміни переходу в граничний стан і є індивідуальними для кожного типу виробів, є основною метою контролю рівня надійності техніки на цьому етапі її експлуатації. Питання забезпечення експлуатації та надійності інформаційних систем та обладнання постають особливо гостро в умовах сучасних викликів, особливо це стосується об'єктів критичної інфраструктури. Тому застосування аналітичних методів і підходів для визначення й оцінювання показників надійності є актуальним прикладним завданням сьогодення, саме такому дослідженню й присвячена стаття.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Визначення показників та оцінювання рівня надійності (безвідмовності) інформаційних систем та обладнання належать до затребуваних та актуальних напрямів досліджень, спрямованих на забезпечення стабільності й безпеки експлуатації складних технічних систем. Особливо гостро постають питання безвідмовної роботи, безпеки й відновлюваності об'єктів критичної інфраструктури в умовах сучасних військових викликів і протидії збройній агресії російської федерації. Основні тенденції, що простежуються в наукових дослідженнях у цьому напрямі, зосереджені на визначенні основних понять і показників надійності, аналізі ризиків та оцінюванні надійності [1–7]. Вони розглядають різні підходи до визначення критеріїв оцінювання, включаючи ймовірнісні моделі, статистичні методи й інші аналітичні інструменти [7; 11; 12]. Використання формальних методів і верифікації сприяє виявленню й виправленню можливих помилок і дефектів. Деякі публікації за цією темою присвячені системам виявлення та відновлення, які допомагають реагувати на помилки й відновлювати роботу інформаційних систем із мінімальними затримками [9; 10]. У багатьох дослідженнях розглядаються методи тестування та валідації, які дають змогу перевірити роботу інформаційних систем і їх компонентів. Ці методи включають функціональне тестування, навантажувальне тестування, тестування на надійність та інші техніки [4–6].

Загальний аналіз публікацій виявляє, що питання забезпечення надійності інформаційних систем та обладнання є актуальною проблемою, дослідники працюють над розробленням нових методів, інструментів і підходів для забезпечення стабільності й безпеки інформаційних систем і технічних об'єктів у сучасних умовах. Дослідження включають аналітичні, формальні, статистичні й експериментальні підходи, а також зосереджуються на практичних аспектах, таких як аналіз ризиків, виявлення несправностей, відновлення та безпека систем.

У технічній літературі [3–5] загальноприйнятим вважається підхід до оцінювання показників надійності технічних виробів (інтенсивності відмов, параметру потоку відмов) як функції наробітку за різних законів розподілу часу між відмовами. Методи статистичного оцінювання показників за різних планів випробувань (спостережень) на надійність закріплені в державних стандартах України [6]. Але, як правило, на практиці реальні умови експлуатації техніки не відповідають жодному плану, установленому стандартом [7; 10].

Деякі автори відмічають, що фізичне зношування технічних виробів виникає як під час їх використання за призначенням – зношування 1-го роду, так і під час простоїв (зберігання) – зношування 2-го роду [3; 4].

Аналіз літератури свідчить про відсутність чітко обґрунтованих рекомендацій щодо врахування впливу на величину статистичного оцінювання показника надійності виробу календарного терміну його експлуатації поряд із наробітком.

**Мета дослідження**

Метою дослідження є наведення особливостей аналітичного забезпечення експлуатації інформаційних систем і технічного обладнання в сучасних умовах, визначення показників надійності й оцінювання рівня безвідмовності складних технічних об'єктів.

**Виклад основного матеріалу дослідження**

Для оцінювання надійності технічних виробів використовують установлені стандартами показники, що подані в табл. 1.

Таблиця 1

**Основні показники надійності**

Властивість	Показник	Позначення
Одиничні		
Безвідмовність	Імовірність безвідмовної роботи	$P(t)$
	Інтенсивність відмов	$\lambda(t)$
	Параметр потоку відмов	$z(t)$
	Середній наробіток до відмови	$T_1$
	Середній наробіток на відмову	$T_0$
Довговічність	Середній ресурс	$T_n$
	Експлуатаційний ресурс (середній строк служби)	$T_e$
	Гамма-відсотковий строк служби	$T_{\gamma\%}$
Ремонтопридатність	Імовірність відновлення	$P_v$
	Інтенсивність відновлення	$\mu(t)$
	Середня тривалість відновлення	$T_v$
Збережуваність	Середній термін збережуваності	$T_z$
	Гамма-відсотковий термін збережуваності	$T_{\gamma\%}$
Комплексні		
Безвідмовність і ремонтпридатність	Коефіцієнт готовності	$K_g$
	Коефіцієнт оперативної готовності	$K_{ог}$
	Коефіцієнт технічного використання	$K_{тв}$

З табл. 1 випливає, що одиничні показники надійності (наприклад, ремонтпридатність) характеризують тільки одну з властивостей технічного об'єкта, тоді як комплексні показники характеризують декілька властивостей і надалі будуть використовуватися як основні для оцінювання ефективності функціонування складних технічних об'єктів і їх функціональних систем. До цих показників належать такі: коефіцієнт готовності, коефіцієнт оперативної готовності, коефіцієнт технічного використання й коефіцієнт збереження ефективності [1].

Коефіцієнт готовності  $K_g(t)$  прийнято визначати як імовірність того, що об'єкт буде перебувати в працездатному стані в будь-який довільний момент часу, окрім запланованих періодів, упродовж яких застосування об'єкта за призначенням не передбачається [2]. Залежність  $K_g(t)$  від часу часто називають нестационарним коефіцієнтом готовності (функцією готовності). Отримати вираз для нестационарного коефіцієнта готовності в аналітичному вигляді досить складно, у загальному випадку він має вигляд [2]

$$K_g = P(t) + \int_0^t P(t-\tau) \cdot \omega_v(\tau) dt, \tag{1}$$

де  $\omega_v(\tau)$  – параметр потоку відновлень.

Поряд із цим для будь-яких законів розподілу наробітку між відмовами та часу відновлення можна довести, що стационарний коефіцієнт готовності має вигляд:

$$K_e = \frac{M(T_0)}{M(T_0) + M(T_e)}, \quad (2)$$

де  $M(T_0)$  – математичне сподівання часу знаходження об’єкта в працездатному стані;  $M(T_e)$  – математичне сподівання часу відновлення об’єкта.

Поряд із  $K_r(t)$  ДСТУ вводиться коефіцієнт оперативної готовності  $K_r(t, t+\tau)$  як імовірність того, що об’єкт буде знаходитися в працездатному стані в довільний проміжок часу, крім запланованих періодів, упродовж яких застосування об’єкта за призначенням не передбачається, із цього моменту буде працювати безвідмовно впродовж заданого інтервалу часу  $\tau$ :

$$K_e(t; t+\tau) = P(t+\tau) + \int_0^t P(t+\tau-x) \omega_e(x) dt. \quad (3)$$

Для дослідження впливу впроваджених методів і режимів технічного обслуговування й ремонту на ефективність процесу технічної експлуатації застосовують ще один комплексний показник надійності – коефіцієнт технічного використання  $K_{тв}$ , який дорівнює відношенню математичного сподівання (МС) часу перебування об’єкта в працездатному стані за деякий період експлуатації  $M(T_0)$  до суми МС часу перебування об’єкта в працездатному стані та сумарного часу простоїв на всіх видах профілактичних і ремонтних робіт:

$$K_e = \frac{M(T_0)}{M(T_0) + M(T_{пр})}, \quad (4)$$

де  $M(T_{пр})$  – сума математичних сподівань часу простою об’єкта на періодичних, регламентних, сезонних роботах, під час проведення доробок, ремонтів, усунення несправностей тощо.

На практиці в процесі експлуатації технічних засобів для оцінювання безвідмовності використовують, як правило, показники інтенсивності відмов, параметра потоку відмов, середній наробіток до відмови, середній наробіток на відмову.

Для оцінювання рівня надійності (безвідмовності) відновлюваних об’єктів використовують характеристики потоку відмов: параметра потоку відмов  $\hat{z}$  або наробітку на відмову  $T_0$ :

$$\hat{z} = \frac{n}{t_\Sigma}, T_0 = \frac{t_\Sigma}{n}, \quad (5)$$

де  $n$  – сумарна кількість відмов і пошкоджень, що виявлені за досліджуваній період часу експлуатації  $\tau$  сукупності однотипних виробів;  $t_\Sigma$  – сумарне напрацювання сукупності однотипних виробів за той же період часу  $\tau$ .

Припустимо, що на виріб впливають два незалежні потоки відмов. Перший потік відмов пов’язаний із наробітком, другий – із календарним часом його експлуатації. Обидва потоки є простішими з відповідними інтенсивностями  $z_1$  і  $z_2$ . При цьому виріб являє собою об’єкт зі змінним режимом експлуатації.

З урахуванням наведених припущень у деякій літературі можна знайти таке граничне співвідношення [8]:

$$z_1 + \frac{z_2}{K_1} = z = \frac{1}{T_0},$$

звідки отримуємо:

$$T_0 = \frac{K_1}{z_1 + z_2 + K_1}. \quad (6)$$

Коефіцієнт  $0 \leq K_1 < 1$  характеризує інтенсивність технічної експлуатації виробу за час  $T_e$  й визначається за виразом:

$$K_1 = \frac{T_e - T_{ТО} - T_{відн} - T_{прост}}{T_e} \approx \frac{t}{T_e}, \quad (7)$$



де  $T_c$  – календарний час експлуатації виробу за період (рік, півріччя), год.;  $T_{TO}$  – середній час ТО виробу за той же період, год.;  $T_{відн}$  – середній час відновлення виробу за період, год.;  $T_{прост}$  – середній час простоювання виробів за період без застосування за призначенням, год.;  $t$  – середній наробіток виробу за період, год.

За своїм змістом  $K_1$  схожий на коефіцієнт планованого застосування  $K_{ПЗ}$ , але останній ураховує наробіток, що планується, і не враховує час простоювання без застосування за призначенням.

За допомогою виразу (7) можна виконати якісну та кількісну оцінку впливу інтенсивності експлуатації виробу  $K_1$  на показник його надійності (безвідмовності)  $T_0$ .

Якісно із (7) видно, що в разі збільшення інтенсивності експлуатації сукупності виробів  $K_1$  збільшується чисельник і добуток у сумі знаменника ( $z \cdot K_1$ ), але у зв'язку з тим, що  $z_1 < 1$ , чисельник зростає швидше, тому оцінка  $T_0$  теж збільшується:

$$K_1 \uparrow \Rightarrow \frac{K_1 \uparrow \uparrow}{z_1 + z_2 + K_1 \uparrow} \Rightarrow T_0 \uparrow. \quad (8)$$

Навпаки, у разі зменшення інтенсивності експлуатації сукупності виробів  $K_1 \downarrow$  оцінка середнього наробітку на відмову  $T_0$  теж зменшується:

$$K_1 \downarrow \Rightarrow \frac{K_1 \downarrow \downarrow}{z_1 + z_2 + K_1 \downarrow} \Rightarrow T_0 \downarrow. \quad (9)$$

Таким чином, статистичний показник надійності змінюється залежно від інтенсивності експлуатації, хоча реальний рівень надійності при цьому залишається незмінним.

Розглянемо граничні випадки. Очевидно, що за достатньо високої інтенсивності відбувається швидке вичерпання ресурсу виробу за наробітком, відсутні тривалі простої без застосування за призначенням, тому інтенсивність потоку відмов, пов'язаних зі старінням матеріалів,  $z_2 \rightarrow 0$ . У цьому випадку, як видно з виразу (7), маємо таке:

$$T_0 = \frac{1}{z_1} \downarrow, \quad (10)$$

тобто міжперіодичне оцінювання дає змогу досить точно оцінити реальний рівень безвідмовності й не залежить від зміни інтенсивності застосування.

Інша справа, якщо інтенсивність експлуатації мала [9–10]. У цьому випадку мають місце довготривалі простої без застосування за призначенням, відбувається інтенсивне старіння матеріалів виробу на етапі, коли досягається вичерпання ресурсу за календарними термінами служби в разі істотного залишку ресурсу за наробітком. У граничному випадку, коли спостерігаються високі значення  $z_2$  при  $z_1 \rightarrow 0$ , вираз (7) набуває вигляду:

$$T_0 = \frac{K_1}{z_2} \downarrow,$$

що свідчить про прямо пропорційну залежність оцінки показника (6) від інтенсивності експлуатації.

### Висновки

Стаття присвячена дослідженню методів забезпечення надійності інформаційних систем і технічного обладнання. Визначено, що питання безвідмовності експлуатації складних систем є особливо актуальними в умовах сучасних викликів і потребують удосконалення підходів і розроблення нових методів та інструментів для забезпечення стабільності, безпеки й надійності систем, зокрема інформаційних і технічних об'єктів з урахуванням вимог сьогодення.

Отримані в результаті оброблення інформації значення показників надійності за період експлуатації, як правило, порівнюються з відповідними значеннями показників за попередні періоди. Такий підхід дає змогу якісно оцінити рівень надійності щодо попередніх періодів експлуатації. При цьому, як зазначено вище, не враховується вплив на статистичну оцінку

показника інтенсивності експлуатації. Статистичні дані про відмови й несправності отримуються за нестабільних умов спостережень, що значно впливає на точність і достовірність оцінки. Одним із часткових завдань дослідження є вдосконалення методики статистичного контролю надійності агрегатів технічного обладнання з урахуванням впливу інтенсивності експлуатації та нестабільних умов спостережень.

### Список використаної літератури

1. Іващенко В.В., Шевчук О.М., Ящук В.М. Надійність систем: методи та засоби оцінювання. Київ : Національний авіаційний університет, 2020. 380 с.
2. Barlow R.E. Engineering reliability. Philadelphia, USA : ASA, SIAM, 1998. 196 p.
3. Smith A.M., Hincheliffe G.R. RCM: gateway to world class maintenance. Burlington, USA : Elsevier Inc., 2004. 340 p.
4. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення: ДСТУ 2864: 94. Чинний з 01.01.1996. Київ : Держстандарт України, 1995. 30 с.
5. Надійність техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860:94. Чинний з 01.01.1996. Київ : Держстандарт України, 1995. 79 с.
6. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги: ДСТУ 2862:94. Чинний з 08.12.1994. Київ : Держстандарт України, 1994. 38 с.
7. Володарський Є.Т., Кошева Л.О. Статистична обробка даних. Київ : Національний авіаційний університет, 2008. 308 с.
8. Навігаційне забезпечення управління рухом суден / В.І. Богом'я та ін. 1-е вид. Київ : ДВВП «Компас», 2012, 336 с.
9. Шевчук М.В., Шевчук О.М., Макаренко О.І. Надійність комп'ютерних систем. Київ : Кондор, 2018. 328 с.
10. Васілевський О.М. Нормування показників метрологічної надійності. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2011. № 4. С. 9–13.
11. Глеч С. Ієрархічна структура системи підтримання прийняття рішень при управлінні періодичністю технічного обслуговування. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2009. Том 14. № 3. С. 97–101.
12. Modeling and Optimization of Discrete Evolutionary Systems of Information Security Management in a Random Environment / V.A. Lakhno et al. *Machine Learning and Autonomous Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Vol. 269. P. 9–22. doi: 10.1007/978-981-16-7996-4\_2 [in English]

### References

- 1 Ivashchenko, V.V., Shevchuk, O.M., Yashchuk, V.M. (2020). Nadiinist system: metody ta zasoby otsiniuvannia – [Reliability of systems: assessment methods and tools]. Kyiv : Natsionalnyi aviatsiynyi universytet. [in Ukrainian]
2. Barlow, R.E. (1998). Engineering reliability. Philadelphia, USA : ASA, SIAM.
3. Smith, A.M., Hincheliffe, G.R. (2004). RCM: gateway to world class maintenance. Burlington, USA : Elsevier Inc.
4. Nadiinist tekhniky. Eksperymentalne otsiniuvannia ta kontrol nadiinosti. Osnovni polozhennia – [Reliability of equipment. Experimental evaluation and reliability control. Substantive provisions]. (1995). DSTU 2864:94 from 1<sup>st</sup> January 1996. Kyiv : Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian]
5. Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia – [Reliability of equipment. Terms and definitions] (1995). DSTU 2860:94. from 1<sup>st</sup> January 1996. Kyiv : Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian]
6. Nadiinist tekhniky. Metody rozrakhunku pokaznykiv nadiinosti. Zahalni vymohy – [Reliability of equipment. Methods of calculating reliability indicators. General requirements] (1994). DSTU 2862:94. from 8<sup>th</sup> December 1994. Kyiv : Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian]

7. Volodarskyi, Ye.T., Kosheva, L.O. (2008). Statystychna obrobka danykh – [Statistical processing of data]. Kyiv : Natsionalnyi aviatsiynyi universytet. [in Ukrainian]
8. Bohomia, V.I., Davydov, V.S., Doronin, V.V., Pashkov, D.P., Tykhonov, I.V. (2012). Navihatsiine zabezpechennia upravlinnia rukhom suden. 1-e Vyd. – [Navigation support for ship traffic management. 1st edition]. Kyiv : DVVP “Kompas”. [in Ukrainian]
9. Shevchuk, M.V., Shevchuk, O.M., Makarenko, O.I. (2018). Nadiinist kompiuternykh system – [Reliability of computer systems]. Kyiv : Kondor. [in Ukrainian]
10. Vasilevskyi, O.M. (2011). Normuvannia pokaznykiv metrolohichnoi nadiinosti – [Standardization of indicators of metrological reliability] *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. Vol. 4. P. 9–13. [in Ukrainian]
11. Hlech, S. (2009). Hierarkhichna struktura systemy pidtrymannia pryiniattia rishen pry upravlinni periodychnistiu tekhnichnoho obsluhovuvannia – [Hierarchical structure of system of support of acceptance of decisions at management by periodicity of technical service]. *Visnyk Ternopilskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*. Vol. 14. Is. 3. P. 97–101. [in Ukrainian]
12. Lakhno, V.A., Kasatkin, D.Y., Skliarenko, O.V., Kolodinska, Y.O. (2022). Modeling and Optimization of Discrete Evolutionary Systems of Information Security Management in a Random Environment. *Machine Learning and Autonomous Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Vol. 269. P. 9–22. Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-16-7996-4\_2 [in English]

Невзоров Андрій Володимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедри математичних дисциплін та інноваційного проектування Приватного вищого навчального закладу «Європейський університет», e-mail: andrey.nevzorov@e-u.edu.ua, ORCID: 0009-0004-8095-5778.

Скляренко Олена Вікторівна – к.ф.-м.н., доцент, завідувач кафедри математичних дисциплін та інноваційного проектування Приватного вищого навчального закладу «Європейський університет», e-mail: olena.skliarenko@e-u.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6555-1223.

Колодінська Яніна Олексіївна – викладач кафедри математичних дисциплін та інноваційного проектування Приватного вищого навчального закладу «Європейський університет», e-mail: yanina.kolodinska@e-u.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3330-7565.

Яровий Роман Олександрович – к.т.н., заступник завідувача кафедри інформаційних систем, програмування та кібербезпеки Приватного вищого навчального закладу «Європейський університет», e-mail: roman.yaroviy@e-u.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8978-8137.

Nevzorov Andrii Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Mathematical Disciplines and Innovative Design of the Private Higher Educational Establishment “European University”, e-mail: andrey.nevzorov@e-u.edu.ua, ORCID: 0009-0004-8095-5778.

Skliarenko Olena Viktorivna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Head of the Department of Mathematical Disciplines and Innovative Design of the Private Higher Educational Establishment “European University”, e-mail: olena.skliarenko@e-u.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6555-1223.

Kolodinska Yanina Oleksiivna – Teacher at the Department of Mathematical Disciplines and Innovative Design of the Private Higher Educational Establishment “European University”, e-mail: yanina.kolodinska@e-u.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3330-7565.

Yarovyi Roman Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Deputy Head of the Department of Information Systems, Programming and Cyber Security of the Private Higher Educational Establishment “European University”, e-mail: roman.yaroviy@e-u.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8978-8137.

УДК 004.932

Т.В. РАТУШНЯК, О.В. ГЛАДЧЕНКО, А.А. ОМЕЛЬЧУК  
 Державний податковий університет  
 Я.С. ВИШЕМІРСЬКА  
 Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ СФЕРИЧНОЇ 3D-ПАНОРАМИ ДЛЯ СОЦІАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ FACEBOOK

*Створення тривимірних панорам дає змогу користувачам отримати вражаючий імерсивний ефект і відчуття присутності. Завдяки розвитку програмного забезпечення й відповідних алгоритмів створення тривимірних панорам зі звичайних фотографій стало більш доступним.*

*3d-панорами знайшли застосування в різних галузях, таких як туризм, нерухомість, віртуальна реальність, відеоігри, дизайн та архітектура. Тривимірні панорами є важливим елементом у VR та AR-додатках. Користувачі вимагають інтерактивного й захопливого контенту, що спонукає популярні соціальні мережі та веб-сайти впроваджувати й підтримувати 3d-технології.*

*У роботі досліджується питання створення віртуальної сферичної 3d-панорами для соціальної мережі Facebook. Запропоновано технологію створення віртуальної сферичної 3d-панорами з допомогою сучасних цифрових інструментів. Актуальність запропонованої технології зумовлена розвитком галузі цифрового дизайну й користувацьким попитом у соціальних мережах на нові технології обробки графічної інформації.*

*На першому етапі розглянуто технічні прийоми й особливості процесу фотографування приміщення на звичайній фотоапарат.*

*На другому етапі виконується огляд сучасних цифрових інструментів для зшивання фотокадрів у сферичну розгортку; виконується зшивання фотокадрів за стандартним алгоритмом, який базується на математичних методах обробки кольорового зображення формату RGB і включає пошук контрольних точок на кожному фотокадрі, зіставлення таких точок, вирівнювання та змішування зображень.*

*На третьому етапі проводиться корекція метаданих файлу-розгортки з урахуванням вимог до параметрів зображення, які необхідні для розпізнавання й демонстрації засобами соціальної мережі Facebook.*

*На четвертому етапі проводиться тестова публікація віртуальних сферичних 3d-панорам у соціальній мережі Facebook.*

*Ключові слова: 3d-панорама, сферична панорама, технологія створення сферичної панорами, зшивання зображень у панораму, зшивання растрових зображень, математичні методи зшивання растрових зображень, цифрові інструменти обробки графічної інформації.*

T.V. RATUSHNYAK, O.V. HLADCHENKO, A.A. OMELCHUK  
 State Tax University  
 Ya.S. VYSHEMIRSKA  
 V.I. Vernadsky Taurida National University

## TECHNOLOGY FOR CREATING A VIRTUAL SPHERICAL 3D-PANORAMA FOR THE SOCIAL NETWORK FACEBOOK

*Creating three-dimensional panoramas allows users to get an impressive immersive effect and a sense of presence. Thanks to the development of software and corresponding algorithms, the creation of three-dimensional panoramas from ordinary photos has become more accessible.*

*3D panoramas have found application in various industries such as tourism, real estate, virtual reality, video games, design, and architecture. Three-dimensional panoramas are an important element in VR and AR applications. Users demand interactive and engaging content, which encourages popular social networks and websites to implement and support 3D technologies.*

*The work explores the issue of creating a virtual spherical 3d panorama for the Facebook social network. The technology of creating a virtual spherical 3d panorama with the help of modern digital tools is proposed. The relevance of the proposed technology is due to the development of the field of digital design and user demand in social networks for new graphic information processing technologies.*

*At the first stage, we consider the techniques and peculiarities of the process of photographing a room with a conventional camera.*

*At the second stage, an overview of modern digital tools for stitching photo frames into a spherical scan is performed; stitching of photo frames is performed according to a standard algorithm, which is based on mathematical*

*methods of processing color images in RGB format and includes the search for control points on each photo frame, comparison of such points, alignment and mixing of images.*

*At the third stage, the metadata of the scanning file is corrected, taking into account the requirements for image parameters, which are necessary for recognition and display by means of the Facebook social network.*

*At the fourth stage, a test publication of virtual spherical 3d panoramas is carried out on the Facebook social network.*

*Key words: 3d-panorama, spherical panorama, technology for creating a spherical panorama, stitching images into a panorama, stitching of raster images, mathematical methods of stitching raster images, digital tools for processing graphic information.*

### Постановка проблеми

3d-панорама – це плоске фотозображення, яке зібране з декількох фотокадрів у сферичну, кубічну або циліндричну проєкцію з метою отримання віртуальної моделі предметно-просторового середовища. Віртуальна модель реалізується засобами інформаційних технологій Flash, QuickTime, DevalVR, Java або JavaScript шляхом розпізнавання й демонстрації 3d-панорами на комп'ютерних пристроях. 3d-панорами створюють з метою збільшення кута огляду предметно-просторового середовища (приміщення або ландшафту) або підвищення деталізації зображення.

Розрізняють такі види 3d-панорам: сферичні – з кутом огляду  $360^\circ$  по горизонталі та  $180^\circ$  по вертикалі; циліндричні – з кутом огляду  $360^\circ$  по горизонталі та близько  $150^\circ$  по вертикалі, з обмеженням огляду по вертикалі – кут огляду таких панорам менше ніж  $360^\circ$  по горизонталі та до  $180^\circ$  по вертикалі, кубічні.

Перевагами сферичних панорам є легке управління й передавання реалістичності. Переглядаючи сферичні панорами, користувач може самостійно змінювати напрямок погляду та переміщатися в будь-яку точку зображення.

Сферичні панорами є сучасним засобом передавання графічної інформації й мають великий попит на ринку цифрового дизайну. Варто відзначити популярність таких проєктів, як «Автентична Україна» [1], у рамках якого розроблено сайт із панорамами музеїв України, або «Віртуальний музей пам'яті війни» [2], на сайті якого зібрано сферичні панорами зруйнованих міст України під час російсько-української війни.

Напрями використання 3d-панорам у галузі цифрового дизайну постійно оновлюються, серед них, зокрема, створення віртуальної реальності за допомогою спеціальних шоломів або окулярів; можливість перегляду 3d-панорам будівлі або території установи на сайті; розміщення 3d-панорам місцевості на картах Google за вказаною адресою; наповнення каталогів 3d-панорам з актуальних місць світової карти на спеціалізованих ресурсах, зокрема 360cities.net або Roundme.com, із яких можна здійснювати перегляд, редагування 3d-панорами (додавати текст, фото, відео) й отримання URL-адресу 3d-панорами для розміщення на сторонніх сайтах; побудова віртуальних екскурсій на основі 3d-панорам [3–5]; публікація 3d-панорам у дописах соціальних мереж [6].

За даними дослідних груп Meltwater і We Are Social [7], у світі переважно використовуються такі соціальні мережі та месенджери, як Facebook, YouTube, WhatsApp, Instagram, WeChat. Серед них тільки соціальна мережа Facebook надає користувачам можливість публікувати й переглядати сферичні панорами. Тому технологія побудови сферичної 3d-панорами для соціальної мережі Facebook є актуальним питанням для галузі комп'ютерних наук.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Для створення 3d-панорам використовують переважно два способи: фотографування на спеціальні камери  $360^\circ$ ; фотозйомка на звичайний фотоапарат з подальшим збиранням (так званим склеюванням або зшиванням) фотокадрів.

Зшивання зображень – це процес створення сцени із ширшим оглядом із декількох зображень, які перекриваються, тобто мають спільні сегменти. Алгоритми зшивання зображень базуються на математичних методах і мають два основні етапи: вирівнювання та змішування.

Огляд алгоритмів зшивання викладено в роботах таких закордонних учених, як М. Brown, D.G. Lowe, М. Fu, М.V.S. Sakharkar, S.R. Gupta [8–10]. Детально описано окремі алгоритми в роботах таких науковців, як М. Meng, S. Liu [11] та М.J.R. Aguiar, T.d.R. Alves, L.M. Honório, I.C.S. Junior, V.F. Vidal [12].

Так, у роботі [11] для зшивання у високоякісне сферичне панорамне зображення фотографій, зроблених камерою з об'єктивом типу «риб'яче око», запропоновано алгоритм на основі асиметричного двонапрямого оптичного потоку. Працю [12] присвячено аналізу сучасних біоінспірованих алгоритмів, застосування яких здатне покращити результати вирівнювання порівняно з відомим чисельним методом Левенберга-Марквардта.

Окремі питання щодо зшивання зображень із використанням детекторів і дескрипторів контрольних (ключових, особливих) точок вивчали такі вітчизняні науковці, як В.О. Гороховатський, А.А. Васильченко, К.П. Манько, Р.П. Пономаренко, Д.В. Пупченко, К.Г. Солодченко.

Детектором називають метод визначення ключової точки, що виділяє її на фоні зображення. Дескриптором є метод, який забезпечує вилучення ключових точок двох зображень і порівняння їх між собою; дескриптори повинні забезпечувати інваріантність знаходження відповідності між ключовими точками щодо перетворень зображень. У роботі [13] розглянуто основні методи, які використовують під час побудови детекторів і дескрипторів: FAST (Features from Accelerated Segment Test), SIFT (Scale Invariant Feature Transform), ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF), AKAZE (Accelerated KAZE), BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features), BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints); головним об'єктом цього дослідження був час, витрачений на знаходження ключових точок і порівняння їх на схожість. У працях [14; 15] проаналізовано особливості новітніх детекторів особливих точок ORB, BRISK і вирішено завдання класифікації зображень на базі структурного опису у вигляді множини особливих точок.

### Мета дослідження

У статті розкривається технологія створення сферичної панорами приміщення для демонстрації в соціальній мережі Facebook способом знімання на звичайний фотоапарат із подальшим зшиванням фотокадрів.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Технологія створення сферичної панорами приміщення для соціальної мережі Facebook має декілька етапів.

Перший етап – знімання. Технічні прийоми й особливості процесу знімання розгорнуто викладено в роботах [5; 16]. Камера фотоапарата встановлюється вертикально на панорамну головку, що дає змогу обертати камеру навколо безпаралаксної точки. Під час процесу фотозйомки робиться необхідна кількість фотокадрів приміщення з поворотом і/або нахилом камери (рис. 1).

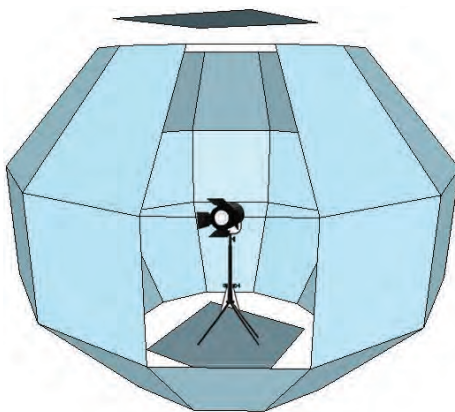


Рис. 1. Фотографування приміщення на звичайний фотоапарат

Для налаштування кроку обертання панорамної головки потрібно визначити кут, у разі повороту на який камера фіксуватиме кожне таке повертання. Це значення залежить від кута огляду об'єктива й розміру матриці фотоапарата. Наприклад, для фотоапарата зі стандартним об'єктивом рекомендується крок зйомки у  $30^\circ$ ; у такому разі варто зробити три ряди фотографій по 12 кадрів у кожному, а також фото зеніту й надиру (рис. 1). «Перекриття сусідніх знімків має бути не менше ніж 20–25%. У деяких випадках, щоб забезпечити якість панорами, збільшують перекриття до половини кадру (50%)» [5]. Тому під час фотографування заплановану кількість кадрів може бути збільшено.

У роботі наведено результати фотографування приміщень Державного податкового університету: аудиторії 220 і 221 (рис. 2, 3). Зроблено 29 фотокадрів аудиторії 220 і 26 фотокадрів аудиторії 221. Фотозйомка проведена у 2018 році для підготовки 3d-туру університетом до його сторіччя; ці матеріали набули нової цінності у 2022 році, коли в ході російсько-української війни російські війська окупували місто Ірпінь та обстрілами зруйнували центральний корпус університету.



Рис. 2. Фотографування аудиторії 220 Державного податкового університету

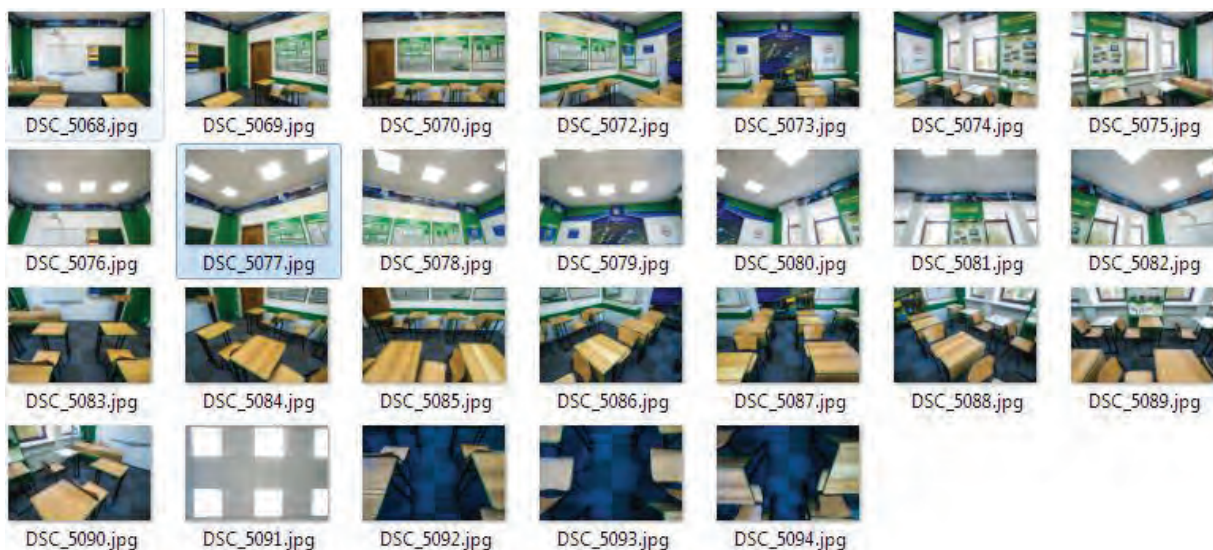


Рис. 3. Фотографування аудиторії 221 Державного податкового університету

Другий етап – зшивання фотокадрів у розгортку (сцену). Отримані фотокадри потрібно зібрати у сферичну розгортку 3d-панорами за допомогою комп'ютерних програм (наприклад,

PTGui або AutoPano) в автоматичному або напівавтоматичному режимі. Зшивання в таких програмах базується на математичних методах обробки кольорового зображення формату RGB і відбувається за таким алгоритмом [8–12]: пошук контрольних точок на кожному зображенні, зіставлення точок, вирівнювання зображень, змішування зображень.

У нашому випадку для зшивання фотокадрів використано програму Kolor Autopano Giga v2.6.0 ML Portable, представлену на рисунку 4. Для завантаження в робочу ділянку програми групи фотокадрів потрібно скористатися кнопкою «Вибрати зображення» з пункту меню «Файл».

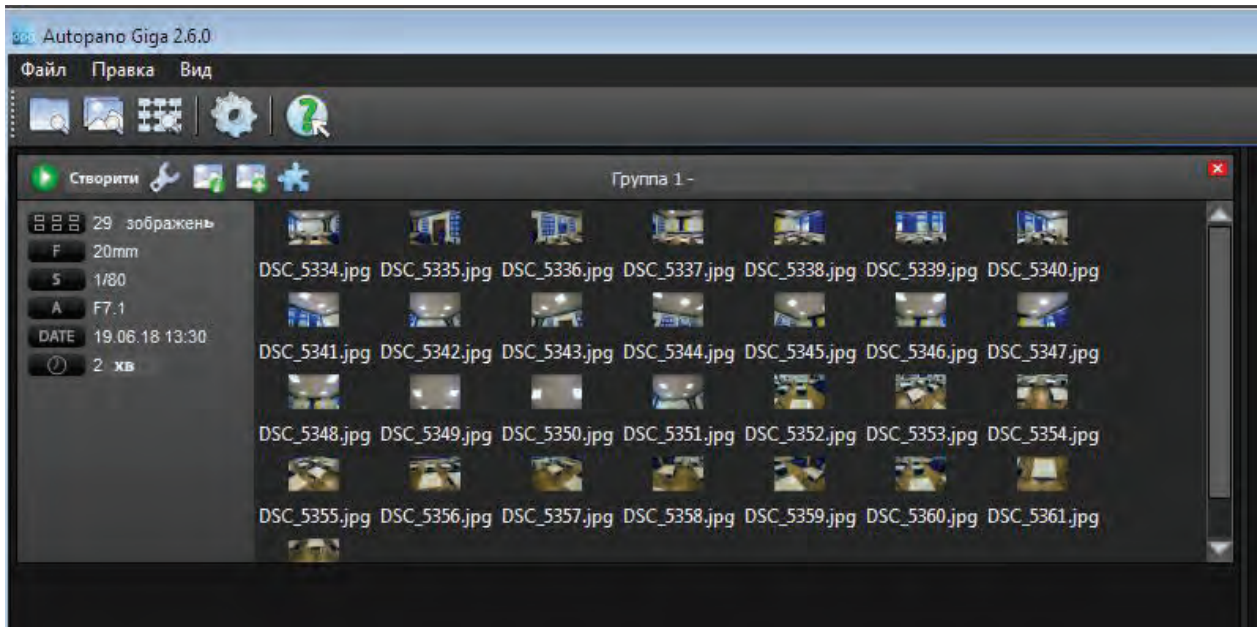


Рис. 4. Завантаження групи фотокадрів у програму Kolor Autopano Giga v2.6.0

Далі потрібно виконати команду «Створити», у результаті чого буде побудовано «чорновий» варіант сферичної розгортки. Результати роботи програми в автоматичному режимі після виконання команди «Створити» представлено на рисунках 5 і 6.



Рис. 5. Розгортка сферичної 3d-панорами аудиторії 220





Рис. 6. Розгортка сферичної 3d-панорами аудиторії 221

Під час фотозйомки та зшивання фотокадрів можуть виникати деякі похибки, описані в роботі [16]. У програмі Kolor Autorano Giga v2.6.0 є можливість виправити їх, скориставшись командою «Редагувати» (рис. 7).

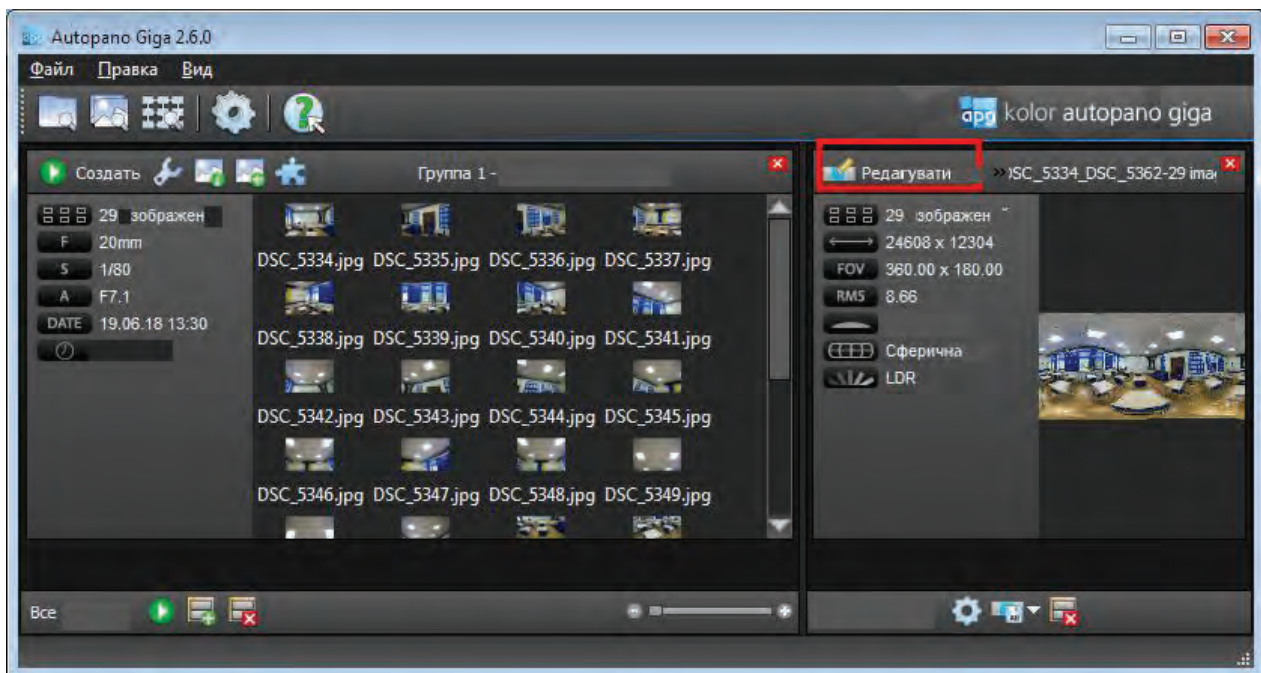



Рис. 7. Виправлення похибок на панорами у програмі Kolor Autorano Giga v2.6.0

Після виправлення похибок (або за їх відсутності) потрібно виконати команду «Зібрати панораму», позначеною відповідною піктограмою . У вікні налаштування можна уточнити висоту й ширину панорами, глибину кольору, формат зображення (JPEG, TIFF, PNG, PSD), роздільну щільність пікселів, формат змішування. У результаті роботи програми на основі «чорнового» варіанта сферичної розгортки буде завершено зшивання фотокадрів у якісну сферичну розгортку.

Третій етап – підготовка метаданих файлу-розгортки. Розпізнавання й демонстрацію файлу-розгортки здійснюють засоби соціальної мережі Facebook, для цього вони звертаються до метаданих файлу. Тому метадані файлу-розгортки повинні мати необхідні параметри, серед яких важливими є ширина й висота зображення відповідно 6000x3000 пікселів.

Для редагування цих параметрів можна використати редактор Adobe Photoshop: через пункт «File» вибрати команду «File Info», експортувати метадані у файл формату XMP, відкрити його текстовим редактором і вставити наведений код (рис. 8) після третього рядка; зберегти файл із метаданими; у редакторі Adobe Photoshop імпортувати ці дані знову в панораму й зберегти її. Також необхідно виконати зміну розміру зображення, відповідно, 6000x3000 пікселів через пункт меню «Image» командою «Size».

```
<rdf:Description rdf:about="" xmlns:GPano="http://ns.google.com/photos/1.0/panorama/">
<GPano:CroppedAreaImageHeightPixels>3000</GPano:CroppedAreaImageHeightPixels>
<GPano:CroppedAreaImageWidthPixels>6000</GPano:CroppedAreaImageWidthPixels>
<GPano:FullPanoHeightPixels>3000</GPano:FullPanoHeightPixels>
<GPano:FullPanoWidthPixels>6000</GPano:FullPanoWidthPixels>
</rdf:Description>
```

Рис. 8. Фрагмент метаданих файлу-розгортки сферичної 3d-панорами

Четвертий етап – публікація файлу-розгортки в соціальній мережі Facebook. Виконується під час створення допису шляхом стандартного додавання світлини/відео.

Результати роботи продемонстровано на рисунку 9 і за посиланнями [18].

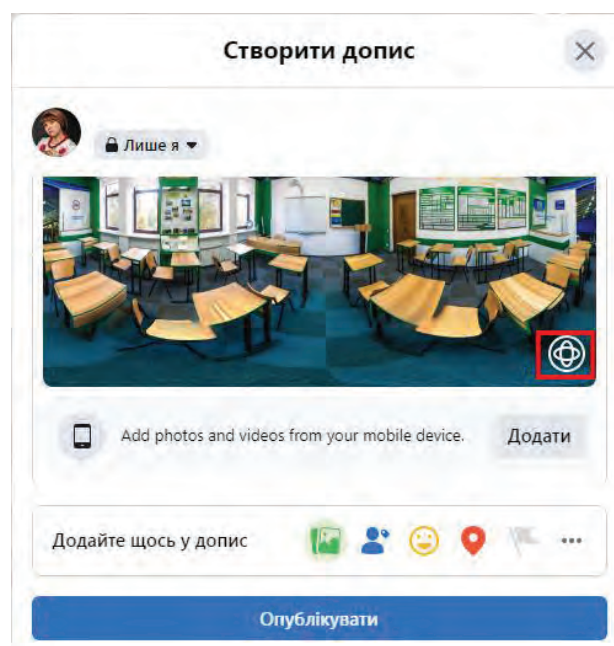


Рис. 9. Публікація файлу-розгортки в соціальній мережі Facebook

### Висновки

Запропонована технологія створення віртуальної сферичної 3d-панорами відповідає користувацькому попиту в соціальних мережах на нові цифрові технології обробки графічної інформації. Перспективою створення таких панорам може бути розробка на їх основі віртуальних екскурсій [4; 5; 17].

Викладена в статті технологія може бути корисною для здобувачів вищої освіти галузі 122 «Комп’ютерні науки», які навчаються за освітньою програмою «Технології цифрового дизайну».

### Список використаної літератури

1. Музеї України проста неба. Ukrainian open-air museums. URL: <https://museums.authenticukraine.com.ua/en/> (дата звернення: 04.07.2023).
2. Віртуальний музей пам’яті війни. Київщина. URL: <https://kyivregiontours.gov.ua/war> (дата звернення: 04.07.2023).
3. Марусей Т.В. Віртуальна екскурсія як напрямок розвитку сучасного туризму. *Економіка та суспільство*. 2021. Вип. 26. doi: 10.32782/2524-0072/2021-26-75
4. Ратушняк Т.В., Вишемірська Я.С. Використання 3d-туру як маркетингового елементу вступної компанії та іміджу ВНЗ. *Проблеми впровадження інформаційних технологій в економіці* : матеріали ІХ міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Ірпінь, 17–18 трав., 2018 р.). Ірпінь, 2018. С. 193–195.
5. Євсєєв К., Казімірова І. Створення 3D-екскурсій в архівних установах: методичні рекомендації. Київ : Держ. архів. служба України, ЦДЕА України, 2021. 26 с.
6. Ратушняк Т.В., Павленко М.Д. Технологія створення сферичної 3d-панорами для соціальної мережі Facebook. *Інформаційні технології – 2021* : зб. тез VIII Всеукр. наук.-практ. конф. молодих науковців (м. Київ, 20 трав. 2021 р.). Київ, 2021. С. 86–88.
7. Digital 2023 – We Are Social UK. We Are Social UK. URL: <https://wearesocial.com/uk/blog/2023/01/digital-2023/> (дата звернення: 04.07.2023).
8. Brown, M., Lowe, D.G. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features. *Int J Comput Vision*. 2007. № 74. P. 59–73. doi: 10.1007/s11263-006-0002-3 (дата звернення: 04.07.2023).
9. Image Stitching Techniques Applied to Plane or 3-D Models: A Review / M. Fu et al. *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23. № 8. P. 8060–8079. doi: 10.1109/JSEN.2023.3251661
10. Sakharkar V.S., Gupta S.R. Image stitching techniques-an overview. *International Journal of Computer Science and Applications*. 2023. Vol. 6. № 2. P. 324–330. URL: <http://researchpublications.org/IJCSA/NCAICN-13/230.pdf> (дата звернення: 04.07.2023).
11. Meng M., Liu S. High-quality Panorama Stitching based on Asymmetric Bidirectional Optical Flow. *2020 5th International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCI)*. Beijing, China, 2020. P. 118–122. doi: 10.1109/ICCI49625.2020.00030
12. Performance Evaluation of Bundle Adjustment with Population Based Optimization Algorithms Applied to Panoramic Image Stitching / M.J.R. Aguiar et al. *Sensors*. 2021. № 21(15). P. 5054. doi:10.3390/s21155054 (дата звернення: 04.07.2023).
13. Вибір методів для пошуку однакових або схожих зображень / О.М. Верес та ін. *Вісник Нац. ун-ту «Львів. політехніка»*. Серія «Інформаційні системи та мережі». 2018. Вип. 887. С. 43–50. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM\\_2018\\_887\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM_2018_887_8) (дата звернення: 04.07.2023).
14. Гороховатський В.О., Пупченко Д.В., Солодченко К.Г. Аналіз властивостей, характеристик та результатів застосування новітніх детекторів для визначення особливих точок зображення. *Системи управління, навігації та зв’язку*. 2018. Вип. 1. С. 93–98. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz\\_2018\\_1\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2018_1_22) (дата звернення: 04.07.2023).
15. Investigation of the relevance image objects estimation method modifications with descriptions in the form of keypoints features set / V. Gorokhovatskyi et al. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*. 2018. № 5(51). P. 74–78. doi: 10.26906/SUNZ.2018.5.074 (дата звернення: 04.07.2023).
16. Мартусь Д.А., Бокарева Ю.С. Дослідження методів зйомки для різних видів панорам. *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті* : матеріали 20-го ювілейного Міжнар. молодіж. форуму (м. Харків, 19–21 квіт., 2016 р.). Харків, 2016. С. 617–618.

17. Ратушняк Т.В. Інформаційні технології банерної реклами в Internet. *Problems of implementation of information technologies in the economy of v-4 countries* : Scientific works. Bratislava, 2019. С. 151–157.
18. Віртуальна сферична 3d-панорама аудиторії 220 Державного податкового університету. Facebook. URL: [https://www.facebook.com/permalink.php?story\\_fbid=190038349370340&id=108312920876217](https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=190038349370340&id=108312920876217) (дата звернення: 04.07.2023).

#### References

1. Ukrainian open-air museums. (2023). Ukrainian open-air museums. URL: <https://museums.authenticukraine.com.ua/en/> [in English]
2. Virtual Museum of War Memory (2023). Kyiv Region. URL: <https://kyivregiontours.gov.ua/war> [in English]
3. Marusei, T. (2021). Virtualna ekskursiia yak napriamok rozvytku suchasnoho turyzmu – [Virtual excursion as a direction of the development of modern tourism]. *Economy and Society*. Vol. 26. doi: 10.32782/2524-0072/2021-26-75 [in Ukrainian]
4. Ratushniak, T. & Vyshemirska, Ya. (2018) Vykorystannia 3d-turu yak marketynhovo elementu vstupnoi kompanii ta imidzhu VNZ – [Using the 3d tour as a marketing element of the admissions company and the image of the university]. *Problemy vprovadzhennia informatsiinykh tekhnologii v ekonomitsi* : materialy IX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii – [Problems of implementing information technologies in the economy : materials of the IX International Scientific and Practice Internet Conference]. Irpin. [in Ukrainian]
5. Ievsieiev, K. & Kazimirova, I. (2021) Stvorennia 3D-ekskursii v arkhivnykh ustanovakh : metodychni rekomendatsii – [Creation of 3D tours in archival institutions : methodological recommendations]. Kyiv : Derzh. arkhiv. sluzhba Ukrainy, TsDEA Ukrainy. [in Ukrainian]
6. Ratushniak, T. & Pavlenko, M. (2021) Tekhnolohiia stvorennia sferychnoi 3d-panoramy dlia sotsialnoi merezhi Facebook – [Technology for creating spherical 3d panoramas for the Facebook social network]. *Informatsiini tekhnologii – 2021* : zbirnyk tez VIII Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh naukovtsiv – [Information technologies – 2021 : A collection of theses of the VIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists]. Kyiv. [in Ukrainian]
7. Digital 2023 – We Are Social UK. (2023) *We Are Social UK*. URL: <https://wearesocial.com/uk/blog/2023/01/digital-2023/> [in English]
8. Brown, M., & Lowe, D. (2007) Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features. *Int J Comput Vision*. Vol. 74. doi: 10.1007/s11263-006-0002-3 [in English]
9. Fu, M., Liang, H., Zhu, C., Dong, Z., Sun, R., Yue, Y. & Yang, Y. (2023). Image Stitching Techniques Applied to Plane or 3-D Models: A Review. *IEEE Sensors Journal*. Vol. 23. doi: 10.1109/JSEN.2023.3251661 [in English]
10. Sakharkar, V. & Gupta, S. (2013). Image stitching techniques-an overview. *International J of Computer Science and Applications*, Vol. 6. No. 2. URL: <http://researchpublications.org/IJCSA/NCAICN-13/230.pdf> [in English]
11. Meng, M. & Liu, S. (2020). High-quality Panorama Stitching based on Asymmetric Bidirectional Optical Flow. *5th International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCI)*. Beijing. doi: 10.1109/ICCI49625.2020.00030 [in English]
12. Aguiar, M.J.R., Alves, T. da R., Honório, L.M., Junior, I.C.S. & Vidal, V.F. (2021). Performance Evaluation of Bundle Adjustment with Population Based Optimization Algorithms Applied to Panoramic Image Stitching. *Sensors*. Vol. 21(15). P. 5054. doi: 10.3390/s21155054 [in English]
13. Veres, O., Kis, Ya., Kuhivchak, V. & Rishniak, I. (2018) Vybir metodiv dlia poshuku odnakovykh abo skhozhykh zobrazhen – [Selection of methods for searching identical or similar images]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnikha”*. Seriiia “Informatsiini systemy ta merezhi”. Vol. 887. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM\\_2018\\_887\\_8](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM_2018_887_8) [in Ukrainian]

14. Horokhovatskyi, V., Pupchenko, D. & Solodchenko, K. (2018) Analiz vlastyvostei, kharakterystyk ta rezultativ zastosuvannia novitnikh detektoriv dlia vyznachennia osoblyvykh tochok zobrazhennia – [Analysis of the properties, characteristics and results of the use of the latest detectors to determine the special points of the image]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*. Vol. 1. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz\\_2018\\_1\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2018_1_22) [in Ukrainian]
15. Gorokhovatskyi, V., Vasylychenko, A., Manko, K. & Ponomarenko, R. (2018). Doslidzhennia modyfikatsii metodu vstanovlennia relevantnosti zobrazen ob'ektiv za opysamy u vyhliadi mnozhyny deskryptoriv kliuchovykh tochok – [Investigation of the relevance image objects estimation method modifications with descriptions in the form of keypoints features set]. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*. Vol. 5(51). P. 74–78. doi: 10.26906/SUNZ.2018.5.074 [in Ukrainian]
16. Martus, D. & Bokareva, Yu. (2016). Doslidzhennia metodiv ziomyki dlia riznykh vydiv panorama – [Study of shooting methods for different types of panoramas]. *Radioelektronika ta molod u XXI stolitti* : materialy 20-ho yuvileinoho mizhnarodnoho molodizhoho forumu – [Radio electronics and youth in the XXI century : materials of the 20th anniversary international youth of the forum]. Kharkiv. [in Ukrainian]
17. Ratushniak, T. (2019) Informatsiini tekhnolohii banernoï reklamy v Internet – [Information technologies of banner advertising on the Internet.]. *Problems of implementation of information technologies in the economy of v-4 countries* : Scientific works. Bratislava. [in Ukrainian]
18. Virtualna sferychna 3d-panorama audytorii 220 Derzhavnoho podatkovoho universytetu – [Virtual spherical 3d panorama of auditorium 220 of the State Tax University]. (2023) *Facebook*. URL: [https://www.facebook.com/permalink.php?story\\_fbid=190038349370340&id=108312920876217](https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=190038349370340&id=108312920876217) [in Ukrainian]

Ратушняк Тетяна Володимирівна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету, e-mail: [ratush\\_tanya@ukr.net](mailto:ratush_tanya@ukr.net), ORCID: 0000-0002-9353-4268.

Гладченко Оксана Вікторівна – к.пед.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету, e-mail: [gov\\_2016-2017ns@ukr.net](mailto:gov_2016-2017ns@ukr.net), ORCID: 0000-0002-1668-633X.

Омельчук Антон Анатолійович – к.т.н., провідний фахівець кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету, e-mail: [tareon@ukr.net](mailto:tareon@ukr.net), ORCID: 0000-0001-6318-7464.

Вишемірська Ярослава Сергіївна – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, e-mail: [vishemirskaya@gmail.com](mailto:vishemirskaya@gmail.com).

Ratushniak Tetiana Volodymyrivna – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer and Information Technologies and Systems of the State Tax University, e-mail: [ratush\\_tanya@ukr.net](mailto:ratush_tanya@ukr.net), ORCID: 0000-0002-9353-4268.

Hladchenko Oksana Viktorivna – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer and Information Technologies and Systems of the State Tax University, e-mail: [gov\\_2016-2017ns@ukr.net](mailto:gov_2016-2017ns@ukr.net), ORCID: 0000-0002-1668-633X.

Omelchuk Anton Anatoliiovych – Ph.D., Senior Specialist at the Department of Computer and Information Technologies and Systems of the State Tax University, e-mail: [tareon@ukr.net](mailto:tareon@ukr.net), ORCID: 0000-0001-6318-7464.

Vyshemirska Yaroslava Serhiivna – Senior Lecturer at the Department of Automated Management of Technological Processes of V.I. Vernadsky Taurida National University, e-mail: [vishemirskaya@gmail.com](mailto:vishemirskaya@gmail.com).

УДК [519.711+536:621.9]

А.В. УСОВ, М.В. КУНЦИН, Ю.І. ЗАЙЧИК  
Національний університет «Одеська політехніка»**ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ  
ДЛЯ БЕЗДЕФЕКТНОЇ ОБРОБКИ ВИРОБІВ ІЗ МАТЕРІАЛІВ,  
СХИЛЬНИХ ДО ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ**

*Метою роботи є інформаційне забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до тріщиноутворення, тому що їх поверхневий шар має спадкові дефекти структурного або технологічного походження. Міцність виробів і їх функціональні можливості залежать від неоднорідності й дефектності структури матеріалів, із яких вони виготовляються. У таких матеріалах є велика кількість різних мікрodefektів, які формуються в поверхневому шарі деталей по ходу технологічних операцій їх одержання. Зниження браку на фінішних операціях даних матеріалів, підвищення експлуатаційних властивостей виробів із цих матеріалів є важливим народногосподарським завданням, вирішення якого зумовлює значну економію матеріальних ресурсів, трудомісткості й собівартості виготовлення деталей. Наявні сьогодні інформаційні відомості про теплові процеси алмазно-абразивної обробки отримані в припущенні однорідності матеріалів, що шліфуються, і не враховують наявності дефектів технологічної спадковості виробів. Феноменологічний підхід у вивченні причин тріщиноутворення матеріалів, схильних до цього виду дефектів, не дає змоги розкрити механізм зародження й розвитку шліфувальних тріщин. Вибір методу дослідження механізму тріщиноутворення ґрунтується на мікродослідженнях, пов'язаних із неоднорідностями, які формуються в поверхневому шарі деталей під час попередніх технологічних операцій.*

*У роботі вирішено такі завдання. Вивчено механізм формування шліфувальних тріщин у поверхневому шарі матеріалів і сплавів, схильних до тріщиноутворення під час алмазно-абразивної обробки, з урахуванням попередніх операцій і спадкових неоднорідностей, що виникають при цьому. Розроблено математичну модель, яка описує термомеханічні процеси в поверхневому шарі під час шліфування деталей із матеріалів і сплавів з урахуванням їх неоднорідностей, що впливають на інтенсивність формування шліфувальних тріщин. Отримано розрахункові залежності між критерієм тріщиностійкості й основними керівними технологічними параметрами. За відомими характеристиками спадкових дефектів визначено граничні значення термомеханічних критеріїв, що забезпечують необхідну якість поверхонь виробів, що обробляються. Створено інформаційну базу для проектування технологічних операцій шліфування матеріалів, які мають спадкові неоднорідності, що забезпечують максимальну продуктивність за забезпечення необхідних показників якості. На основі отриманих критеріальних співвідношень побудовано алгоритм забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до втрати якості поверхнього шару деталей.*

*Ключові слова: інформаційне забезпечення, технологічні можливості, бездефектна обробка виробів, приліки, тріщиноутворення, моделі, неоднорідність.*

A.V. USOV, M.V. KUNITSYN, Yu.I. ZAYCHYK  
Odesa Polytechnic National University**INFORMATION PROVISION OF TECHNOLOGICAL OPPORTUNITIES  
FOR DEFECT-FREE PROCESSING OF PRODUCTS MADE  
OF MATERIALS PRONE TO CRACK FORMATION**

*The work aims to provide information on technological possibilities for defect-free processing of products from materials prone to cracking since their surface layer has hereditary defects of structural or technological origin. The products' strength and functionality depend on the inhomogeneity and defectiveness of the structure of the materials from which they are made. Such materials have many different micro defects formed in the surface layer of parts during the technological operations of their production. Reducing marriage in the finishing operations of these materials and increasing the operational properties of products made of these materials is an essential national and economical task, the solution of which leads to a significant saving of material resources, labour intensity and cost of manufacturing parts. The currently available information on the thermal processes of diamond abrasive processing is obtained based on the homogeneity of the polished materials. It does not consider the presence of defects in the technological heredity of the products. The phenomenological approach in studying the causes of cracking of materials prone to this type of defect does not allow to reveal the mechanism of genesis and development of grinding cracks. The choice of the method of investigation of the mechanism of crack formation is based on micro-research related to inhomogeneities, which are formed in the surface layer of parts during previous technological operations.*

*The following tasks are solved in the work. The mechanism of the formation of grinding cracks in the surface layer of materials and alloys prone to crack formation during diamond-abrasive processing has been studied, taking into account previous operations and hereditary inhomogeneities that arise. A mathematical model has been developed that describes thermomechanical processes in the surface layer during grinding of parts made of materials and alloys, taking into account their inhomogeneities, which affect the intensity of the formation of grinding cracks. Calculated dependences between the crack resistance criterion and the main controlling technological parameters were obtained. According to the known characteristics of hereditary defects, the limit values of thermomechanical criteria, which ensure the necessary quality of the surfaces of the processed products, are determined. An information base has been created to design technological operations of grinding materials with hereditary inhomogeneities, ensuring maximum productivity while ensuring the necessary quality indicators. Based on the obtained criterion ratios, an algorithm was built to ensure technological capabilities for defect-free processing of products from materials prone to loss of quality of the surface layer of parts.*

*Key words: information support, technological capabilities, defect-free processing of products, cauter, cracking, models, heterogeneity.*

### **Постановка проблеми**

Різні технологічні операції сприяють виникненню в поверхневому шарі спадкових дефектів, до яких належать неметалеві включення, флокени, повітряні пори, мікротріщини усадкового характеру (виплавка), деформація кристалічних зерен, тріщини ліквідаційного походження (поковка, протягування) крупнозернистість, скупчення карбідів (ТО, ТМО, ХТ0), сколи, вириви, сітка поверхневих тріщин, внутрішні тріщини, відшаровування /фінішні операції/, припали.

Ці дефекти, будучи концентраторами напруження, зумовлюють тріщиноутворення як у процесі обробки матеріалу, так і під час його експлуатації.

Особливо значні втрати від браку через спадкові дефекти на фінішних операціях. Шліфування, будучи для більшості деталей остаточною операцією, що забезпечує суттєве підвищення експлуатаційних властивостей за рахунок високої точності, низької шорсткості, супроводжується високотемпературним впливом, що призводить до припикання та значного браку від виходу придатних виробів через утворення тріщин.

Зниження браку на фінішних операціях цих матеріалів, підвищення експлуатаційних властивостей виробів із цих матеріалів є важливим народногосподарським завданням, вирішення якого зумовлює значну економію матеріальних ресурсів, трудомісткості й собівартості виготовлення деталей.

Наукова проблема полягає в інформаційному забезпеченні технологічних можливостей щодо визначення впливу спадкових дефектів, сформованих на попередніх заготівельних операціях, операціях ТО, ТМО й нанесення покриттів на тріщиностійкість поверхневого шару під час шліфування та визначення оптимальних технологічних умов обробки, з урахуванням накопичень, матеріалів і сплавів, особливо схильних до тріщиноутворення в процесі шліфування.

Установлення закономірностей формування шліфувальних тріщин під час обробки деталей із матеріалів і сплавів, схильних до цього виду дефектів, з урахуванням спадкових мікронеоднорідностей, що виникають по всьому ходу технології їх виготовлення, починаючи зі способів отримання заготовок, і на цій основі розробка інформаційного забезпечення технологічних умов бездефектного шліфування.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Операція шліфування – основна обробна операція важко навантажених деталей із високоміцних сталей і сплавів, до яких належать зубчасті колеса, вали, штампи, елементи електричних машин, електроніки тощо. Цій операції піддаються також вироби, до робочих поверхонь яких висувають підвищені вимоги щодо точності, шорсткості, що істотно впливають на їх експлуатаційні властивості. До таких виробів належать деталі зі зносостійкими покриттями, високо коерцитивні магніти типу ЮНДКТ, які використовуються в сучасних електричних машинах, приладах, апаратах.

Схильність металів до утворення тріщин під час шліфування залежить від металургійної та структурної спадковості, яка визначається способами виплавки та ступенем розкислення,

фазовими перетвореннями в сплавах, режимами термічної, хіміко-термічної обробки тощо. При цьому параметрами, що враховують залежність напруженого стану від структурних складників, є набір механічних характеристик ( $K_{1C}$ ,  $K_C$ ,  $K_{ISC}$ ,  $K_{th}$ ) механіки руйнації.

Відмінною особливістю операції шліфування є виділення великої кількості теплоти, основна частина якої сприймається оброблюваною деталлю й викликає на окремих її ділянках структурні зміни – припіки. Ці дефекти зумовлюють зменшення вихідної твердості поверхні, утворення розтягувальних залишкових напружень, знижують контактну витривалість, втрату міцності деталей [1; 2].

Для великої групи металів і сплавів, не схильних до структурних перетворень у процесі обробки їх шліфуванням, характерним видом браку є дефекти типу тріщин, що істотно знижують експлуатаційні властивості виробів.

Характер та інтенсивність тріщиноутворення у виробках багато в чому визначаються теплофізичними властивостями оброблюваних матеріалів, їх структурою, спадковістю попередніх і подальших технологічних операцій, їх параметрами. Під час експлуатації деталей, поверхневий шар яких містить шліфувальні тріщини, руйнування виробів відбувається за місцями їх скупчення.

Якість поверхневого шару формується під впливом термомеханічних явищ, що супроводжують фінальні операції. Тому в роботах [1; 3–7] як основний показник фізико-механічного стану оброблюваних поверхонь використовується теплонапруженість алмазно-абразивної обробки. На підставі розроблених ними моделей температурних полів вивчали закономірності утворення дефектів типу припиків і технологічні можливості їх усунення залежно від теплофізичних властивостей оброблюваних матеріалів, технологічних параметрів їх обробки.

Однак наявні нині моделі теплових процесів алмазно-абразивної обробки отримані в припущенні однорідності матеріалів, що шліфуються, і не враховують наявності дефектів технологічної спадковості виробів [2; 8]. У зазначених роботах стан поверхневого шару деталі розглядається в основному з якісного боку або оцінюється в кожному окремому випадку експериментальними методами. Так, схильність магнітних сплавів до тріщиноутворення під час обробки їх шліфуванням пов'язують з особливостями їх магнітної та кристалічної структури, призначеної для отримання високих магнітних властивостей [9]. Відсутність будь-яких кількісних зв'язків тріщиностійкості магнітів з іншими властивостями не дає змоги однозначно користуватися наявною інформаційною базою бездефектної обробки шліфуванням. Є дослідження впливу структурних перетворень у сталях на утворення шліфувальних тріщин, згідно з якими наявність великої кількості аустеніту в підповерхневому шарі деталей призводить до утворення розтягувальних напружень, що реалізуються у вигляді крихких тріщин [10].

Структурні перетворення на матеріалах виробів не можна вважати «самостійною» причиною виникнення шліфувальних тріщин, оскільки структурні напруження досягають руйнівних значень, формуючись протягом значного проміжку часу. Шліфування характеризується короткочасністю, великими швидкостями нагріву й охолодження, за яких структурні зміни незначні, а термомеханічні напруження досягають граничних значень.

Механізм утворення тріщин у поверхневому шарі деталей із покриттями пояснюють дією тимчасових розтягувальних температурних напружень, що перевищують граничні значення, а відшаровування покриття від основного металу – дією залишкових напружень у поверхневому шарі [11]. Розглянуті при цьому моделі напружено-деформованого стану деталей із покриттями не враховують шматочкову неоднорідність (покриття-матриця), повністю відсутні дослідження впливу неоднорідності покриття на механізм дефектоутворення [11].

Феноменологічний підхід у вивченні причин тріщиноутворення матеріалів, схильних до цього виду дефектів, не дає можливості розкрити механізм зародження й розвитку шліфувальних тріщин. Вибір методу дослідження механізму тріщиноутворення ґрунтується на



мікродослідженнях, пов'язаних із неоднорідностями, які формуються в поверхневому шарі деталей під час попередніх технологічних операцій.

Інтенсивність появи тріщин багато в чому визначається наявністю різноманітних неоднорідностей, що виникають у поверхневому шарі по ходу технології виготовлення деталі. Особливо небезпечними з погляду зародження тріщин є такі спадкові дефекти, як флокени, гострі порожнини, домени, сторонні вclusions. Тому побудова теорії тріщиноутворення під час шліфування з використанням критеріїв механіки руйнування можлива лише на основі поглибленого вивчення механізму зародження тріщин у вершинах концентраторів, якими є металургійні, структурні й технологічні дефекти.

Для управління якістю деталі під час шліфування необхідно вивчити закономірності формування термомеханічного стану поверхневого шару з урахуванням його неоднорідності. Високопродуктивне бездефектне шліфування матеріалів, чутливих до тріщиноутворення, необхідно здійснювати з урахуванням наслідних дефектів на граничних режимах за збереження рівноважного стану, що ще не викликають утворення тріщин. Досі немає інформаційного забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до тріщиноутворення.

Під час постановки завдання підвищення якості фінішних операцій деталей виникає проблема оцінювання впливу неоднорідностей, вибору технологічних параметрів, які виключають дефектоутворення на оброблюваних поверхнях. Широка номенклатура матеріалів, схильних до тріщиноутворення, різноманіття їх властивостей, розміри, орієнтація, розміщення й розподіл спадкових дефектів сприяли тому, що сьогодні відсутні рекомендації з усунення шліфувальних тріщин під час обробки поверхонь виробів. У зв'язку із цим необхідно розробити інформаційне забезпечення оптимізації термомеханічного стану поверхневого шару виробів з урахуванням спадкових дефектів, що унеможливають виникнення дефектів типу тріщин і припиків на фінішних операціях.

Тому завдання визначення інформаційного забезпечення технологічних умов бездефектного шліфування виробів, матеріали яких схильні до дефектоутворення, є актуальним.

### **Мета дослідження**

Метою дослідження є розробка інформаційного забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів, матеріали яких схильні до тріщиноутворення, з урахуванням їх неоднорідностей, що формуються в поверхневому шарі деталей по ходу їх виготовлення.

Досягнення цієї мети вимагало постановки й вирішення таких основних завдань:

1. Вивчити механізм формування дефектів у поверхневому шарі деталей із матеріалів і сплавів, схильних до тріщиноутворення під час обробки їх шліфуванням із урахуванням попередніх операцій і спадкових неоднорідностей, що виникають при цьому.

2. Розробити математичну модель, яка описує термомеханічні процеси в поверхневому шарі під час шліфування деталей із матеріалів і сплавів з урахуванням їх неоднорідностей, що впливають на формування шліфувальних припиків і тріщин, і визначити критерії дефектоутворення.

3. Створити алгоритм забезпечення технологічних умов шліфування матеріалів, які мають спадкові неоднорідності, що забезпечують максимальну продуктивність за умови забезпечення необхідних показників якості.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Під час вибору й обґрунтуванні математичної моделі враховували, що процес шліфування деталей супроводжується як тепловими, так і механічними явищами. Однак переважний вплив на напружено-деформований стан поверхневого шару надають температурні поля. З огляду на те що основна маса поверхневого шару металу під час шліфування знаходиться в пружному стані,

можна скористатися моделлю термопружного тіла, що відображає взаємозв'язок механічних і теплових явищ при кінцевих значеннях теплових потоків. Так як для дослідження термомеханічного стану прошліфованих поверхонь важливою є інформація про поширення температур і напружень за глибиною та напрямом руху інструменту, то розглядається плоска задача.

Під час складання розрахункової схеми (рис. 1) допускається, що деталь типу заготовок може бути подана у вигляді кусково-однорідних умовних шарів з різними властивостями, розташованих на основному матеріалі-матриці, що дає змогу вивчати термомеханічні процеси під час шліфування деталей із кількома типами покриттів, завтовшки  $\Delta a_k$ , нанесених на основний матеріал. Така схема визначає теплові та деформаційні умови сполучення шарів за межами їх розділу –  $a_k$ .

Вплив неоднорідностей у вигляді фазових перетворень нестійких структур, міжзеренних плівок, меж контуру спадкових аустенітних зерен, карбідної строчечності, неметалевих включень, раковин, флокінів та інших дефектів, що виникають у поверхневому шарі, наявності в поверхневому шарі включень і дефектів у вигляді умовних тріщин (рис. 1).

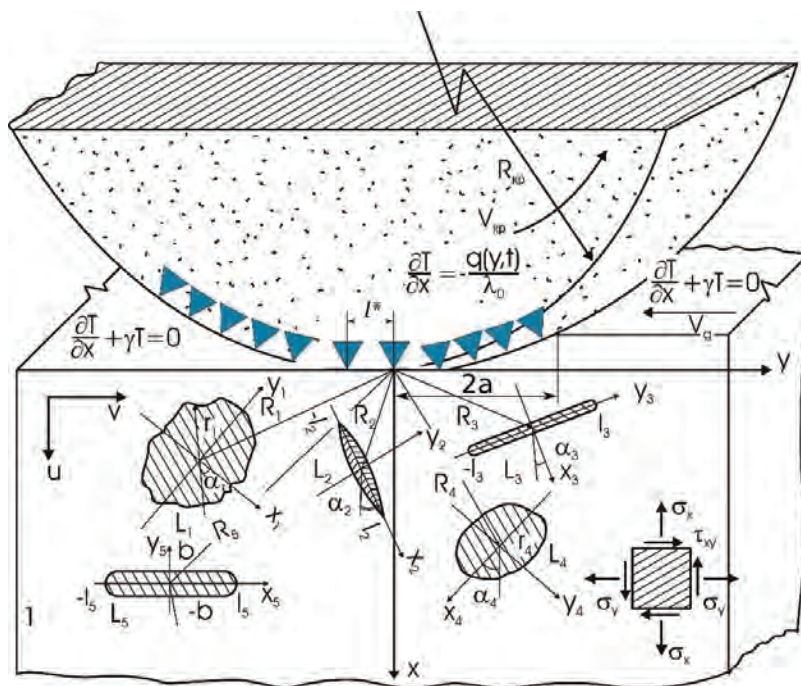


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення термомеханічного стану на фінішних операціях під час обробки виробів з багат шаровими покриттями, верхній шар яких має спадкоємні дефекти

Система рівнянь, що визначають тепловий і напружено-деформований стан під час шліфування поверхні деталей із покриттями, верхній шар яких має неоднорідності типу включень і тріщин, містить таке [3]:

Рівняння нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \begin{matrix} 0 \leq x < \infty; \\ -\infty < y < \infty. \end{matrix} \quad (1)$$

Рівняння пружності Ламе в переміщеннях:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{u} = B^T \frac{\partial T}{\partial x}; \bar{u}(x, y) = \frac{u}{2G}; \bar{v}(x, y) = \frac{v}{2G}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial y} \frac{1}{1-2\mu} + \Delta \bar{v} = B^T \frac{\partial T}{\partial y}; B^T = \frac{4G(1+\mu)}{1-2\mu} a_k; \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (3)$$

де  $T(x, y, \tau)$  – температура в точці з координатами  $(x, y)$  і в будь-який момент часу  $\tau$ ;  $a$  – температуропровідність матеріалу;  $a_t$  – температурний коефіцієнт лінійного розширення;  $\mu, G$  – постійні Ламе;  $u, v$  – компоненти вектора переміщень точки  $(x, y)$ ;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  – оператор Лапласа.

Початкові умови для цього завдання можна взяти у вигляді:

$$T(x, y, 0). \tag{4}$$

Граничні умови для температурних і деформаційних полів, що враховують теплообмін із поверхні поза зоною контакту інструменту з деталлю й інтенсивного тепловиділення в зоні обробки, мають вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q(y, \tau)}{\lambda}, |y| \left\langle a^*, -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \gamma T = 0, |y| \right\rangle a^*, \tag{5}$$

$$\sigma_x(x, y, \tau)|_{x=0} = \tau_{xy}(x, y, \tau)|_{x=0} = 0, \tag{6}$$

де  $q(y, \tau)$  – інтенсивність теплового потоку, що формується в результаті взаємодії кола з деталлю;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, що шліфується;  $2a^*$  – довжина зони контакту кола з оброблюваною поверхнею;  $\gamma$  – коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем;  $\sigma_x, \tau_{xy}$  – нормальні та дотичні напруження.

Умови сполучення шарів (покриттів):

- для температурних полів

$$T^{k-1}(a_k - 0, y, \tau) = T^k(a_k + 0, y, \tau); \lambda_{k-q} \frac{\partial T^{k-1}}{\partial x}(a_k - 0, y, \tau) = \lambda_k \frac{\partial T^k}{\partial x}(a_k + 0, y, \tau); \tag{7.1}$$

- для деформаційних полів

$$v_j^{k-1}(a_k - 0, y) = v_j^k(a_k + 0, y); \sigma_x^{k-1}(a_k - 0, y) = \sigma_x^k(a_k + 0, y); \tau_{xy}^{k-1}(a_k - 0, y) = \tau_{xy}^k(a_k + 0, y), \tag{7.2}$$

де  $\lambda_k$  – теплопровідність  $k$ -го шару;  $a_k$  – товщина  $k$ -го шару;  $v_j^k$  – компоненти переміщень в  $k$ -му шарі.

Для поверхневих шарів, що мають структурні й технологічні неоднорідності, умови розривності рішення залежно від типу дефекту будуть:

- на включеннях

$$\bar{u} = 0, \sigma_x \neq 0; \bar{v} = 0, \tau_{xy} \neq 0; \tag{8.1}$$

- на тріщиноподібних дефектах

$$\sigma_x = 0, \bar{u} \neq 0; \tau_{xy} = 0, \bar{v} \neq 0. \tag{8.2}$$

Гранично рівноважний стан поверхневого шару, що деформується, оцінювався класичними критеріями міцності.

З наявних критеріїв руйнування, які враховують локальні фізико-механічні властивості неоднорідних матеріалів, найбільш прийнятними для цього випадку є критерії силового підходу, пов'язані з використанням поняття коефіцієнта інтенсивності напруження (КІН) [7; 12; 13]. Коли навантаження призводить до того, що інтенсивність напружень  $K_I$  стає рівною граничному значенню  $K_{Ic}$ , то тріщиноподібний дефект перетворюється на магістральну тріщину.

Моделювання впливу вихідної шматкової однорідності матеріалів, що шліфуються (деталей із покриттями), на термомеханічні процеси здійснюється методом розривних рішень [5; 6; 14]. Під ними розуміються такі рішення, які задовольняють рівнянню теплопровідності Фур'є та пружності Ламе всюди, крім меж дефектів. У разі переходу через кордон неоднорідностей поля зміщень і напруження зазнають розриви I роду, тобто з'являються їх стрибки  $\langle v \rangle, \langle v \rangle, \langle \sigma_x \rangle, \langle \tau_{xy} \rangle$ .

Застосування узагальнених перетворень Фур'є за змінними  $x, y$  до рівнянь (1)–(7) з урахуванням (8) дає змогу отримати рекурентні співвідношення, що зв'язують зміщення й напруження в  $k$ -му шарі з напруженнями та зсувами, що формуються в першому шарі під дією нестационарних температурних полів.

Вплив неоднорідностей у поверхневому шарі сталей і сплавів на інтенсивність тріщиноста сколоутворення під час шліфування досліджується так. В умовах нерівномірного нагріву в поверхневому шарі виникають теплові деформації, які спричиняють температурне напруження. Під дією цих напружень, що концентруються в місцях розташування дефектів, і відбувається утворення шліфувальних тріщин.

Найбільший інтерес становить поведінка напружень в околі вершин дефектів типу тріщин, гострих включень, структурних недосконалостей, тобто особливостей напружень за  $y \rightarrow \pm l_k$ . Характер поля напружень у безпосередній близькості від кінця дефекту, отриманого в рамках класичної теорії пружності, визначається коефіцієнтами інтенсивності напружень  $K_I = iK_{II}$  [5; 6; 13; 15].

Так, дослідження інтенсивності напружень у вершинах дефекту довжиною  $2l$ , розташованого на глибині  $a^*$ , коли на поверхні тіла ( $x = 0, |y| \leq a^*$ ) заданий тепловий потік  $q$ , дало змогу встановити граничне значення цього потоку  $q^*$ , за якого вказаний дефект починає розвиватися в магістральну тріщину:

$$q^* = \frac{2\sqrt{3}\lambda(1-\nu)K_{4C}}{\alpha_2 E l \sqrt{\pi l} \sigma^*}. \quad (9)$$

Взаємний вплив дефектів на інтенсивність напружень виявляється в разі розташування їх із відривом один від одного трохи більше  $a^* = 1/3$ . При цьому найменша тріщиностійкість матеріалу досягається, якщо дефекти орієнтовані щодо один одного під кутом  $\phi = \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{4}$ .

Геометрія і властивості включень можуть створювати умови як гальмування, так і розвитку шліфувальних тріщин. Якщо тепловий потік спрямований паралельно більшій осі еліптичного включення і прямолінійної термоізолюваної тріщини, то при коефіцієнті лінійного температурного розширення  $\alpha_i^B$  включення більшого, ніж основного, матеріалу  $\alpha_i^M$  ( $\alpha_i^B > \alpha_i^M$ ), збільшення жорсткості до зростання  $K_I$  щодо різних відносин коефіцієнтів теплопровідності, складників матеріалу.

Це призводить до зниження тріщиностійкості поверхневого шару. Для дефектів типу тріщин, що в шарі з меншим коефіцієнтом  $\alpha_i$ , орієнтація дефекту сильно впливає на величину КІН.

У разі значного видалення тріщини, розташованої в більш жорсткому шарі від лінії розділу, КІН  $K_I$  приймає максимальні значення, коли дефект орієнтований паралельно цій лінії, а з наближенням тріщини до межі розділу максимум  $K_I$  досягається, коли вона стає перпендикулярною цій межі. Якщо ж тріщина знаходиться в менш жорсткому матеріалі, то максимум  $K_I$  досягається, коли перпендикулярна тріщина лінії розділу. Коефіцієнт  $K_{II}$  стає максимальним при кутах між лінією розділу шарів, близьких до  $\pi/6$ , незалежно від відносної жорсткості шарів.

Для бездефектної обробки сталей і сплавів, що мають тріщиноподібні дефекти та включення, під час вибору режимів обробки й характеристик інструменту варто керуватися граничними значеннями теплового потоку, що формується в процесі шліфування, щоб спадкові дефекти не вийшли з рівноважного стану.

Насправді поверхневий шар шліфованих матеріалів містить неоднорідності й дефектність спадкового походження, що володіють тим чи іншим ступенем випадковості. Особливо істотна стохастичність мікронеоднорідностей у сплавах ЮНДКТ, цементованих сталях, різноманітних покриттях. У цьому разі використовують гіпотезу найслабшої ланки – дефекту з найбільшим геометричним розміром.

Вплив конструктивних параметрів інструменту на термомеханічний стан поверхневого шару визначався за допомогою модельної задачі (1)–(5) і граничних умов у вигляді:

$$q(y, \tau) = \frac{c\sqrt{\tau}}{\lambda} \left[ H(y) - H(y - 2a^*) \right] \sum_{k=0}^n \sigma(y + kl - v_{kp}\tau), \quad (10)$$

де  $H(y)$  – функція Хевісайда;  $\sigma(y)$  – дельта-функція Дірака;  $n$  – кількість зерен, що проходять у зоні контакту за час  $\tau = \frac{\sqrt{\pi t_{\text{шл}}}}{v_{kp}}$ ;  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу виробу;  $c\sqrt{\tau}$  – тепловий потік від одиничного зерна;  $v_g, v_{kp}, t_{\text{шл}}$  режими шліфування,  $2a^*$  – довжина дуги контакту кола з деталлю;  $l^*$  – відстань між ріжучими зернами. Отримані теоретично й підтверджені експериментально максимальні значення миттєвої температури  $T_M$ , від одиничних зерен до постійного складника –  $T_K$ , які використані надалі як критеріальні під час прогнозування умов утворення дефектів типу припиків і глибини їх залягання.

Вплив технологічної спадковості на тріщиностійкість металів під час шліфування вивчали за допомогою параметра механіки руйнування  $K_{Ic}$ , що враховує залежність напружено-деформованого стану від структурних складників поверхневого шару.

Підвищення міцності сталей зі зростанням умісту вуглецю або зниження температури відпустки після загартування закономірно призводить до спаду  $K_{Ic}$ , а отже, до посилення процесу тріщиноутворення під час їх шліфування. Для досягнення належного рівня тріщиностійкості цілком виправданим є використання високої відпустки й покращення таких сталей перед фінішними операціями. Такі заходи дають змогу усунути схильність цих сталей до появи шліфувальних тріщин.

Сталі в стані оборотної відпускнуої крихкості особливо схильні до інтенсивного виникнення шліфувальних тріщин. Дослідження поверхонь руйнування зразків зі сталі в цьому стані показали, що збільшення тривалості відпустки викликає суттєві зміни в мікробудуванні. У незахищеній сталі тріщини розвиваються по в'язкому мікромеханізму, а в стані оборотної відпускнуої крихкості переважаючим ставало руйнування шляхом міжзеренного сколу й розтріскування карбідних частинок.

Вплив домішок на тріщиностійкість сталей і сплавів є значним.

Так, зокрема, встановлено негативний вплив умісту сірки (0,008–0,009 %) у високоміцних сталях типу 18X2H4BA на їх тріщиностійкість. На підставі фактографічних досліджень показано, що осередками мікроруйнування в цих сталях є сульфідні включення.

Легування сталей, що супроводжується подрібненням зерна, сприяє певною мірою зростанню  $K_{Ic}$ .

Підвищення чистоти сплавів по домішках завжди поєднує з одночасним зростанням тріщиностійкості й короткочасної міцності. Таким же сприятливим фактором у зниженні схильності сталей до тріщиноутворення під час їх шліфування є обробка поверхневого шару на наддрібне зерно. Подрібнення зерна сталі шляхом циклічної електротермічної обробки від 15 – бала (I-2 мкм) забезпечує підвищення  $K_{Ic}$  на 40–50 % і вихід придатних виробів із матеріалів, що особливо чутливі до шліфувальних тріщин, збільшується у 2,5–3 рази.

Усунення зернограничної крихкості, до якої схильні високоміцні сплави, можна здійснити підвищенням температури відпустки або високотемпературною термомеханічною обробкою, що сприяє деформації меж аустенітного зерна, унаслідок чого гладкі межі піддаються фрагментації й набувають специфічної зубчатості. Це призводить до зростання міцності границь та усунення зернограничного руйнування під час шліфування таких сплавів.

Кількісні оцінки тріщиностійкості магнітотвердих сплавів проводили залежно від способів отримання заготовок (рис. 2) і подальшої їх термообробки на  $\gamma$ -фазу, термомагнітної обробки на  $a + a'$  фазу за різних режимів відпустки і швидкості охолодження. Контрольованими параметрами при цьому були значення напруження вигину  $\sigma_{\text{виг}}$ , розтягування  $\sigma_p$ , коефіцієнта  $K_{Ic}$

і характеристики магнітних властивостей – коерцитивна сила матеріалу по намагніченості  $h_c$  і залишкова індукція  $B_r$ . Експериментальні дані свідчать, що значення  $K_{lc}$  різні для моно- й полікристалів ЮНДКТ у стадії заготівлі. Це пояснюється тим, що відсотковий уміст неметалевих включень у сплавах, отриманих різними способами, змінюється в межах. Фазовий склад цих сплавів змінює значення коефіцієнта  $K_{lc}$ . Так для полікристалів у вихідному стані  $K_{lc} = 30$  МПа м, тоді як наявність  $\gamma$ -фази підвищує  $K_{lc}$  до 97 МПа м. Установлено, що  $\gamma$ -фаза, будучи пластичнішою, порівняно з основною матрицею цього сплаву сприяє гальмуванню мікротріщин.

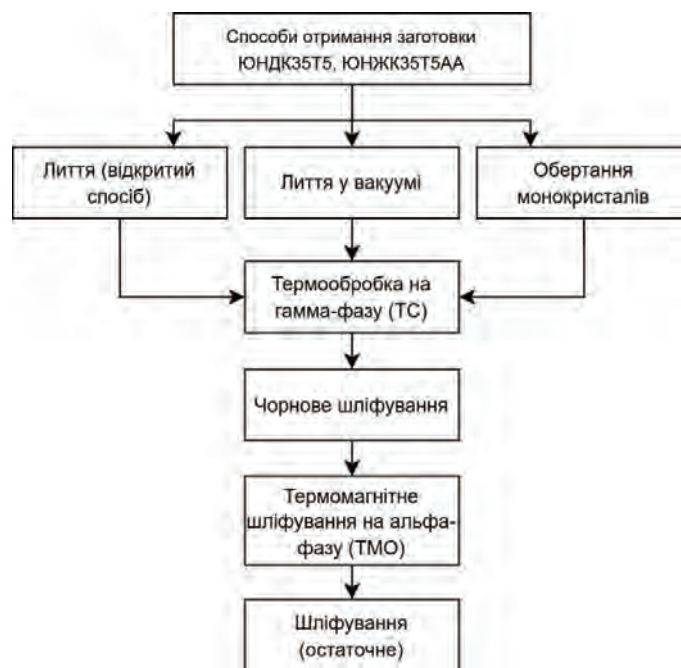


Рис. 2. Структура технологічного процесу виробництва магнітів ЮНДКТ

Тому аналіз структури технологічного процесу виготовлення магнітів є важливим етапом у виявленні резервів підвищення виходу придатних магнітів на операціях остаточного шліфування, так як основні дефекти – тріщино- і сколоутворення – виникають саме під час остаточної обробки цих магнітів.

Заготовки постійних магнітів зі сплавів алніко й тикональ одержують переважно методом лиття. Сьогодні використовують такі способи лиття – відкритий і вакуумний. Найбільш поширеним відкритим способом лиття є плавка [9].

Фрактографічний аналіз зламів у стані  $\gamma$ -фази виявляє, що зона руйнування має інтеркристалічний характер із вираженими лініями ковзання. Однак наявність цієї фази в сплаві ЮНДКТ знижує коерцитивну силу на 40%, залишкову магнітну індукцію – на 15–20%, максимальну магнітну енергію більше ніж на 60%. Тому ці сплави піддаються надалі термомагнітній обробці. Особливістю структури високо коерцитивного стану сплавів, що розглядаються, є періодичне чергування еліптично образних частинок  $a'$ -фази, оточених матрицею  $a$ -фази. Подальша обробка цих сплавів шліфуванням викликає формування дефектів типу тріщин у поверхневому шарі. Причому інтенсивність тріщиноутворення пов'язана з режимами термообробки, які, у свою чергу, впливають на розміри частинок  $a'$ -фази й напрям ТМО щодо поздовжньої подачі під час шліфування. Домінуючими технологічними параметрами, що впливають на тріщиностійкість і контактну температуру, є глибина шліфування та характеристики кола. Так, у разі шліфування з різною глибиною алмазними колами тріщиностійкість вимірюється незначно, на відміну від діапазону зміни  $K_{lc}$  під час обробки колами 24A25CM18K5. Контактна температура в першому випадку істотно нижча, ніж у другому.

На основі побудованої моделі вивчено механізм виникнення шліфувальних тріщин із позицій впливу геометрії та фізичних властивостей  $a'$ -фази та її орієнтації щодо напрямку шліфування цих магнітів у високо коерцитивному стані. При цьому використані також умови рівноваги структурних складників  $a'$ -фази залежно від домінуючих факторів процесу шліфування й в'язкості руйнування  $K_{lc}$ , магніту, виконання яких не призводить до виникнення тріщин на оброблювальній поверхні.

Розробка технологічних критеріїв для управління процесом бездефектного шліфування здійснена на базі встановлених функціональних зв'язків між фізико-механічними властивостями оброблюваних матеріалів та основними технологічними параметрами.

Якість оброблюваних поверхонь буде забезпечено, якщо за допомогою керівних технологічних параметрів підібрати такі технологічні умови обробки (режими, мастильно-охолоджувальні середовища й характеристики інструменту), що поточні значення температури шліфування  $T(x, y, \tau)$ , теплового потоку  $q(y, \tau)$ , напружень  $\sigma(M)$  і коефіцієнта  $K_{lc}$  не перевершуватимуть своїх граничних значень.

Реалізація системи обмежувальних нерівностей за величинами самої температури й глибини її поширення у вигляді:

$$T(x, y, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) \times H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} f(x, y, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_M; \quad (11)$$

$$T([h], 0, \tau) = \frac{C}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^n H\left(\tau - \frac{kl}{v_{kp}}\right) \times H\left(\frac{L+kl}{v_{kp}}\right) \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \psi(x, \tau, \tau') d\tau' \leq [T]_{c.n.}; \quad (12)$$

$$T_k(0, y, \tau) = \frac{Cv_{kp}}{\pi\lambda\sqrt{v_g}} \int_a^\tau \int_{-e}^e \frac{\chi(\eta, t) e^{\frac{(y-\eta)^2}{4(\tau-t)}}}{2\sqrt{\pi(\tau-t)}} \times \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi(\tau-1)}} + \gamma e^{\gamma^2(\tau-t)} [1 + \Phi(\gamma\sqrt{\tau-t})] \right\} d\eta dt \leq [T]; \quad (13)$$

$$T_k^{\max}(L, 0) = \frac{Cv_{kp}\alpha}{\lambda v_q^2} \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{v_q\sqrt{Dt_{gr}}}{\alpha}\right) \right] \leq [T] \quad (14)$$

дає змогу уникнути утворення шліфувальних припіків і може послугувати основою для проектування циклів шліфування за тепловим критерієм.

Обробку матеріалів і сплавів без шліфувальних тріщин можна забезпечити, якщо обмежити граничними значеннями, що формуються в зоні інтенсивного охолодження напруження:

$$\sigma_{\max}(x, \tau) = 2G \frac{1+v}{1-v} \alpha_i T_k \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \leq [\sigma_i]. \quad (15)$$

У разі домінуючого впливу спадкової неоднорідності на інтенсивність утворення шліфувальних тріщин необхідно користуватися критеріями, до структури яких входять детерміновані зв'язки технологічних параметрів і властивості самих неоднорідностей. Як такі можна використовувати обмеження коефіцієнта інтенсивності напружень:

$$K = \frac{1}{\pi\sqrt{l}} \int_{-e}^e \sqrt{\frac{l+t}{l-t}} \sigma_x, \sigma_y dt \leq K_{lc} \quad (16)$$

або забезпечення за допомогою керівних технологічних параметрів граничного значення теплового потоку, за якого зберігається рівновага структурних дефектів:

$$q^* = \frac{P_z v_{kp} \alpha_s}{\sqrt{Dt_{gr}}} \leq \frac{\sqrt{3}\lambda K_{lc}}{Hl\sqrt{\pi l \sigma}}. \quad (17)$$

Умови бездефектного шліфування можна реалізувати, використовуючи інформацію про структуру матеріалу, що обробляється. Так, у разі превалюючого характеру структурних недосконалостей

довжиною  $2l$ , їх регулярного розташування щодо зони контакту інструменту з деталлю можна як критеріальне співвідношення використовувати умову рівноваги дефекту у вигляді:

$$l_0 < \frac{K_C^2}{x [GT_k (1 + \nu) \alpha_t]^2} \quad (18)$$

У цій формулі технологічна частина міститься у зв'язку з величиною контактної температури  $T_k$  з умовами обробки.

Наведені нерівності можуть бути інформаційною базою для визначення зв'язків температурного й силового полів із керівними технологічними параметрами. Вони задають ділянку поєднань цих параметрів, які відповідають отриманим термомеханічним критеріям. При цьому враховуються властивості матеріалу, що обробляється, і гарантується забезпечення необхідної якості виробів.

На основі отриманих критеріальних співвідношень побудовано алгоритм забезпечення якості поверхневого шару деталей під час шліфування з урахуванням максимальної продуктивності обробки (рис. 3).

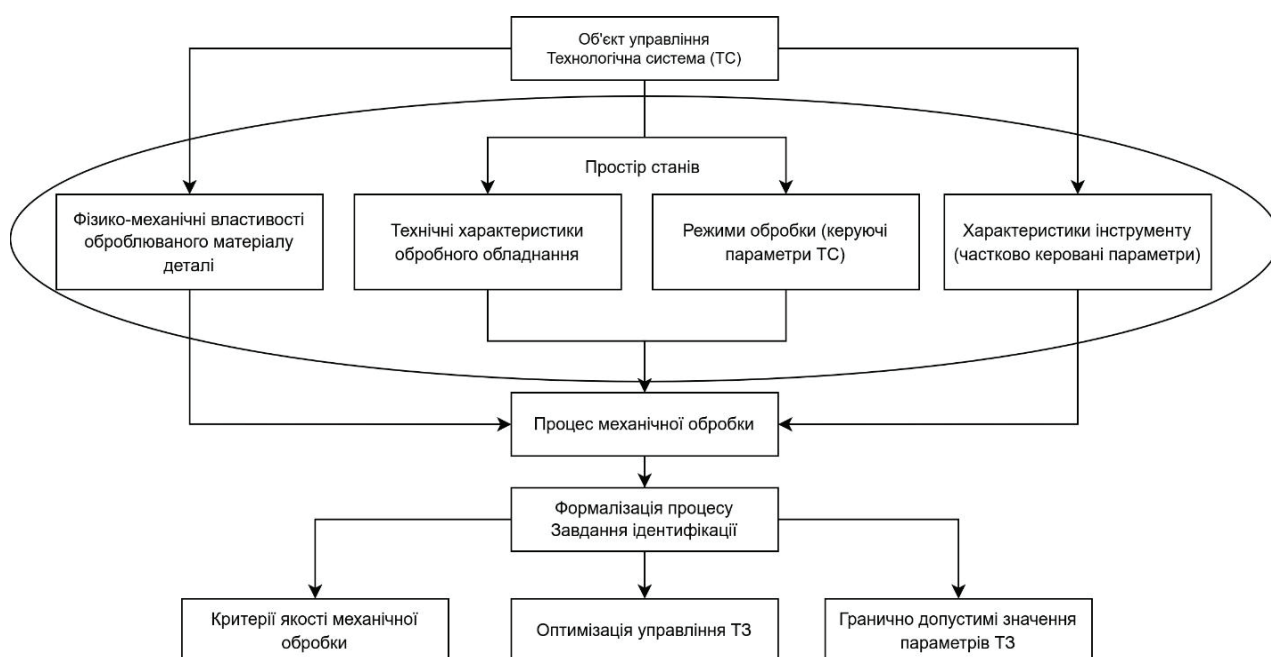


Рис. 3. Алгоритм забезпечення якості механічної обробки за оптимально допустимих параметрів технологічної системи

### Висновки

У результаті виконаних досліджень створено інформаційне забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до тріщиноутворення, що полягає в установленні розрахункових залежностей щодо визначення впливу спадкових дефектів, сформованих від попередніх операцій, на тріщиностійкість поверхневого шару під час шліфування, технологічних умов обробки з урахуванням накопичених пошкоджень і неоднорідностей матеріалів і сплавів, особливо схильних до тріщиноутворення в процесі шліфування, що має вагоме народногосподарське значення для зниження браку на фінішних операціях і підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин.

1. Вивчено механізм формування дефектів у поверхневому шарі деталей із матеріалів і сплавів, схильних до тріщиноутворення під час обробки їх шліфуванням, з урахуванням попередніх операцій до спадкових неоднорідностей, що виникають при цьому. Установлено, що шліфувальні тріщини мають теплову природу, тому як критерії бездефектної обробки необхідно вибирати теплові критерії.



2. Розроблено математичну модель, яка описує термомеханічні процеси в поверхневому шарі під час шліфування деталей із матеріалів і сплавів з урахуванням їх неоднорідностей, що впливають на формування шліфувальних тріщин. При цьому вперше отримано розрахункові залежності між критерієм тріщиностійкості й основними керівними технологічними параметрами. За відомими характеристиками спадкових дефектів визначено граничні значення теплового потоку, що забезпечують необхідну якість шліфованих поверхонь.

3. На основі отриманих критеріальних співвідношень побудовано алгоритм забезпечення технологічних можливостей для бездефектної обробки виробів із матеріалів, схильних до втрати якості поверхневого шару деталей, з урахуванням максимальної продуктивності обробки.

### Список використаної літератури

1. Davim J.P. Modern mechanical engineering: Research, development and education. Springer, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-45176-8
2. Теплофізика механічної обробки : підручник / А.В. Якимов та ін. Одеса : Астропринт, 2000. 256 с.
3. Kheir N. Systems modeling and computer simulation. Routledge, 2018.
4. Моделювання та оптимізація систем : підручник / В.М. Дубовой. Вінниця : ПП «ТД Едельвейс», 2017. 804 с.
5. Nesetova V., Lajtai E.Z. Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1973. № 10(4). P. 265–284. doi: 10.1016/0148-9062(73)90038-7
6. McMeeking R.M. Electrostrictive stresses near crack-like flaws. *ZAMP Journal of Applied Mathematics and Physics*. 1989. № 40(5). P. 615–627. doi: 10.1007/BF00945867
7. Kunitsyn M., Usov A., Zaychyk Y. Information technologies of the analysis for models to ensure quality characteristics of the working surfaces during mechanical processing. doi: 10.1007/978-3-031-32767-4\_26.
8. Avila S.H.J., Chen C. Strength of materials. United Kingdom : IntechOpen, 2020.
9. Bhargava G.K., Sharma P., Bhardwaj S., Sharma I. An introduction to hard ferrites: From fundamentals to practical applications. *Materials Research Forum LLC*. 2023.
10. Hansen P.F. The science of construction materials. Germany : Springer Berlin Heidelberg, 2009.
11. An open modular architecture controller based online chatter suppression system for cnc milling / Z. Han et al. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. doi: 10.1155/2015/985837
12. Zisis V.A., Ladopoulos E.G. Two-dimensional singular integral equations exact solutions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1990. № 31(2). P. 227–232. doi: 10.1016/0377-0427(90)90165-V
13. Freiman S.W., Jr J.J.M. The fracture of brittle materials: Testing and analysis. John Wiley & Sons, 2019.
14. Popov G.Y. New Integral Transformations and Their Applications to Some Boundary-Value Problems of Mathematical Physics. *Ukrainian Mathematical Journal*. 2002. № 54(12). P. 1992–2005.
15. Sih G.C. Methods of analysis and solutions of crack problems. Springer Science & Business Media, 1973.

### References

1. Davim, J.P. (2014). Modern mechanical engineering: Research, development and education. Springer. doi: 10.1007/978-3-642-45176-8 [in English]
2. Yakymov, A.V., Usov, A.V., Slobodanyk, P.T. & Iorhachov, D.V. (2000). Теплофізика механічної обробки – [Thermal physics of mechanical processing]. Odessa : Astroprynt.
3. Kheir N. (2018). Systems modeling and computer simulation. Routledge. [in Ukrainian]

4. Dubovoi, V.M., Kviatnyi, R.N., Mykhalov, O.I. & Usov, A.V. (2017). Modeliuvannia ta optymizatsiia system – [Modeling and optimization of systems]. Vinnytsia : PP “TD Edelveis”. [in Ukrainian]
5. Nesetova, V. & Lajtai, E.Z. (1973). Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 10(4). P. 265–284. doi: 10.1016/0148-9062(73)90038-7 [in English]
6. McMeeking, R.M. (1989). Electrostrictive stresses near crack-like flaws. *ZAMP Journal of Applied Mathematics and Physics*. Vol. 40(5). P. 615–627. doi: 10.1007/BF00945867 [in English]
7. Kunitsyn, M., Usov, A. & Zaychyk, Y. (2023). Information technologies of the analysis for models to ensure quality characteristics of the working surfaces during mechanical processing. doi: 10.1007/978-3-031-32767-4\_26 [in English]
8. Avila S.H.J. & Chen, C. (2020). Strength of materials. United Kingdom : IntechOpen [in English]
9. Bhargava, G.K., Sharma, P., Bhardwaj, S. & Sharma, I. (2023). An introduction to hard ferrites: From fundamentals to practical applications. *Materials Research Forum LLC*. [in English]
10. Hansen, P.F. (2009). The science of construction materials. Germany : Springer Berlin Heidelberg. [in English]
11. Han, Z., Jin, H., Li, M. & Fu, H. (2015). An open modular architecture controller based online chatter suppression system for cnc milling. *Mathematical Problems in Engineering*. P. 1–13. doi: 10.1155/2015/985837 [in English]
12. Zisis, V.A., Ladopoulos, E.G. (1990). Two-dimensional singular integral equations exact solutions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Vol. 31(2). P. 227–232. doi: 10.1016/0377-0427(90)90165-V [in English]
13. Freiman, S.W., Jr J.J.M. (2019). The fracture of brittle materials: Testing and analysis. John Wiley & Sons. [in English]
14. Popov, G.Y. (2002). New Integral Transformations and Their Applications to Some Boundary-Value Problems of Mathematical Physics. *Ukrainian Mathematical Journal*. Vol. 54(12). P. 1992–2005. [in English]
15. Sih, G.C. (1973). Methods of analysis and solutions of crack problems. Springer Science & Business Media. [in English]

Усов Анатолій Васильович – д.т.н., професор, завідувач кафедри вищої математики та моделювання систем Національного університету «Одеська політехніка», e-mail: usov\_a\_v@op.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3965-7611.

Куніцин Максим Володимирович – к.т.н., доцент кафедри інтегрованих технологій управління, заступник директора Інституту підготовки іноземних громадян Національного університету «Одеська політехніка», e-mail: m.v.kunitsyn@op.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1764-8922.

Зайчик Юрій Ігорович – аспірант кафедри вищої математики та моделювання систем Національного університету «Одеська політехніка», e-mail: yuriy.zaichik@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8577-1095.

Usov Anatolii Vasylovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics and System Modeling of the Odesa National Polytechnic University, e-mail: usov\_a\_v@op.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3965-7611.

Kunitsyn Maksym Volodymyrovych – PhD, Associate Professor at the Department of Integrated Management Technologies, Deputy Director of the Institute of Training of Foreign Citizens of the Odesa National Polytechnic University, e-mail: m.v.kunitsyn@op.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1764-8922.

Zaichyk Yurii Ihorovych – PhD Student at the Department of Higher Mathematics and System Modeling of the Odesa National Polytechnic University, e-mail: yuriy.zaichik@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8577-1095.

Н.О. ЯРЕЦЬКА, А.О. РАМСЬКИЙ  
Хмельницький національний університет  
В.В. МОРОЗ

Хмельницький кооперативний торговельно-економічний інститут

## ПОБУДОВА РОЗВ'ЯЗКІВ ОСНОВНИХ РІВНЯНЬ ЛІНЕАРИЗОВАНОЇ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ ДЛЯ КІЛЬЦЕВИХ ТІЛ

*У статті представлено метод побудови розв'язків основних рівнянь лінеаризованої теорії пружності для тіл (штампів) кільцевої форми з довільним контуром поперечного перерізу. Розв'язки виписано в системі кругових циліндричних координат для пружного скінченного кільцевого штамп з початковими (залишковими) напруженнями в разі вісесиметричної деформації щодо геометричної осі тіла. Поданий метод побудови може застосовуватися під час дослідження просторових вісесиметричних статичних контактних задач лінеаризованої теорії пружності в координатах початкового деформованого стану для стисливих і нестисливих тіл у випадку однорідних початкових напружень. Це дасть змогу виявити вплив початкових напружень на контактні характеристики тіл і посприяти підвищенню надійності й довговічності інженерних споруд і конструкцій.*

*Важливо відмітити, що врахування початкових (залишкових) напружень у межах лінеаризованої теорії пружності істотно змінює постановку та значно ускладнює розв'язання класичних контактних задач. Тому результати, запропоновані в статті, можна використовувати під час різних постановок подібних задач, де є штампи кільцевої або навіть циліндричної форми. Отримані розв'язки можуть також суттєво допомогти в разі виведення аналітичних залежностей для компонентів напружено-деформованого стану скінченних кільцевих штампів із початковими (залишковими) напруженнями при задоволенні граничних умов конкретної контактної задачі.*

*Розв'язки отримано у вигляді гармонійних функцій, що задовольняють рівняння Лапласа. Вони виведені за допомогою методу розділення змінних (методу Фур'є) й адаптовані для задоволення граничних умов конкретних контактних задач.*

*Умовою існування єдиного розв'язку основного диференціального рівняння лінеаризованої теорії пружності для стисливих і нестисливих тіл є умова сильної еліптичності рівнянь. Ураховуючи це, загальні розв'язки кільцевих тіл представимо у двох можливих варіантах, а саме: 1) у випадку рівних коренів диференціального рівняння; 2) у випадку нерівних його коренів. Такий підхід побудови дав змогу використати отримані результати для числових досліджень контактної взаємодії пружних тіл у випадках довільної структури їх пружного потенціалу.*

*Ключові слова: кільцеві штампи, лінеаризована теорія пружності, контактні задачі, початкові напруження, залишкові напруження, рівняння Лапласа, метод розділення змінних.*

N.O. YARETSKA, A.O. RAMSKYI  
Khmelnyskyi National University  
V.V. MOROZ

Khmelnyskyi Cooperative Trade and Economic Institute

## CONSTRUCTION OF SOLUTIONS OF THE BASIC EQUATIONS OF THE LINEARIZED THEORY OF ELASTICITY FOR RING BODIES

*A method of constructing solutions of the basic equations of the linearized theory of elasticity for bodies (stamps) of ring shape with an arbitrary cross-sectional contour is presented. The solutions are written in the system of circular cylindrical coordinates for an elastic finite ring stamp with initial (residual) stresses for the case of axisymmetric deformation relative to the geometric axis of the body. The presented method of construction can be used in the study of spatial axisymmetric static contact problems of the linearized theory of elasticity in the coordinates of the initial deformed state for compressible and incompressible bodies in the case of uniform initial stresses. This will reveal the influence of initial stresses on the contact characteristics of bodies and contribute to increasing the reliability and durability of engineering structures and structures.*

*It is important to note that taking into account the initial (residual) stresses within the linearized theory of elasticity significantly changes the formulation and significantly complicates the solution of classical contact problems. Therefore, the results proposed in the article can be used to solve similar problems where there are annular or even cylindrical stamps. The obtained solutions can also significantly help in the derivation of analytical dependencies for the components of the stress-strain state of finite ring dies with initial (residual) stresses when the boundary conditions of a specific contact problem are met.*

*The solutions are obtained in the form of harmonic functions that satisfy the Laplace equation. They are derived using the method of separation of variables (Fourier method) and adapted to meet the boundary conditions of specific contact problems.*

*The condition for the existence of a single solution of the basic differential equation of the linearized theory of elasticity for compressible and incompressible bodies is the condition of strong ellipticity of the equations. Taking this into account, we will present the general solutions of ring bodies in two possible variants, namely: 1) in the case of equal roots of the differential equation; 2) in the case of unequal roots. This construction approach made it possible to use the obtained results for numerical studies of the contact interaction of elastic bodies in cases of arbitrary structure of their elastic potential.*

*Key words: ring dies, linearized theory of elasticity, contact problems, initial stresses, residual stresses, Laplace equation, method of separation of variables.*

### **Постановка проблеми**

У роботі представлено метод побудови розв'язків основних рівнянь лінеаризованої теорії пружності для тіл кільцевої форми з довільним контуром поперечного перерізу в загальному вигляді. Такі розв'язки використовують під час дослідження контактної взаємодії пружних стисливих або нестисливих кільцевих тіл із початковими напруженнями в межах теорії великих початкових (кінцевих) деформацій і двох варіантів теорії малих початкових деформацій лінеаризованої теорії пружності при довільній структурі пружного потенціалу.

Важливо відмітити, що врахування початкових (залишкових) напружень у межах лінеаризованої теорії пружності істотно змінює постановку й значно ускладнює розв'язання класичних контактних задач. Тому результати, запропоновані в статті, можна використовувати під час різних постановок подібних задач, де є штампи кільцевої або навіть циліндричної форми. Отримані розв'язки можуть також суттєво допомогти в процесі виведення аналітичних залежностей для компонентів напружено-деформованого стану скінченних кільцевих штампів із початковими (залишковими) напруженнями при задоволенні граничних умов конкретних контактних задач.

Так, наприклад, необхідність у розв'язку цієї задачі може виникати під час розрахунків на міцність і визначення контактних напружень і переміщень для пружних колон будівель, димових труб, градирень, водонапірних веж та інших висотних споруд із підошвами з фундаментів на вітрове навантаження або навантаження від власної ваги.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Запропонований метод побудови розв'язків для кільцевих тіл застосовувався під час дослідження низки просторових вісесиметричних статичних контактних задач лінеаризованої теорії пружності в координатах початкового деформованого стану для стисливих і нестисливих тіл у випадку однорідних початкових деформацій [1–3]. Подібний метод побудови розв'язків, але для циліндричних тіл використано в працях [4; 5]. Залучення теорії рівнянь математичної фізики [6; 7] дало змогу отримати аналітичні та числові розв'язки вказаних контактних задач, а також виявити вплив початкових напружень на контактні характеристики тіл, що взаємодіють.

Загалом побудова аналітичних розв'язків для кільцевих (а в деяких випадках і для циліндричних) тіл є підґрунтям підвищення надійності й довговічності інженерних споруд і конструкцій, оскільки використовується в багатьох конкретних контактних задачах [4; 8–10], актуальність яких очевидна.

### **Мега дослідження**

У загальному вигляді можна побудувати аналітичні розв'язки основного диференціального рівняння лінеаризованої теорії пружності для стисливих і нестисливих тіл (штампів) кільцевої форми з довільним контуром поперечного перерізу, ураховуючи при цьому умову існування єдиного розв'язку – умову сильної еліптичності диференціальних рівнянь [4].

Представити розв'язки кільцевих тіл у двох можливих варіантах: у випадку рівних коренів диференціального рівняння й у випадку нерівних його коренів.

На прикладі числового розв'язку контактної задачі про тиск пружного кільцевого штампа на пружний півпростір із початковими (залишковими) напруженнями [1] провести чисельний аналіз і графічно представити в безрозмірних координатах напруження в кільцевому штампі та його контактні переміщення.

### Виклад основного матеріалу дослідження

#### Побудова розв'язків в аналітичному вигляді

Представимо загальні розв'язки лінеаризованої теорії пружності щодо статичної задачі [1–5] для стисливих і нестисливих тіл у випадку вісесиметричної деформації.

Для дослідження будемо застосовувати координати деформованого стану  $Oy_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), які пов'язані з лагранжевими координатами  $x_i$  (природного стану) співвідношеннями:  $y_i = \lambda_i x_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ), де  $\lambda_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) – коефіцієнти видовження, що визначають переміщення початкового (залишкового) стану.

Спираючись на [4], основне диференціальне рівняння лінеаризованої теорії пружності запишемо у вигляді:

$$L'_{m\alpha} U_\alpha = 0, \quad (1)$$

$$\text{де } L'_{m\alpha} = \begin{cases} \omega'_{ij\alpha\beta} \partial^2 / \partial y_i \partial y_\beta & \text{– для стисливих тіл,} \\ \kappa'_{ij\alpha\beta} \partial^2 / \partial y_i \partial y_\beta & \text{– для нестисливих тіл;} \end{cases}$$

$U_\alpha$  – переміщення по нормалі та дотичній до контуру поперечного перерізу в площині  $y_3 = const$ ,  $\omega'_{ij\alpha\beta}$ ,  $\kappa'_{ij\alpha\beta}$  – складники тензорів модулів пружності четвертого порядку, що мають властивість  $\omega'_{ij\alpha\beta} = \omega'_{\beta\alpha ji}$ ,  $\kappa'_{ij\alpha\beta} = \kappa'_{\beta\alpha ji}$ .

Застосувавши операторний метод, розв'язок (1) матиме вигляд [4]:

$$u_i^{(k)} = \partial \det \|L'_{rs}\| / \partial (L'_{ik}) \Phi^{ik}, \quad (k = \overline{1,3}), \quad (2)$$

де  $\Phi^{ik}$  – функції, які визначаються з таких рівнянь:

$$\det \|L'_{rs}\| \Phi^{ik} = 0, \quad (k = \overline{1,3}). \quad (3)$$

Ураховуючи (2), загальний розв'язок просторових статичних задач для стисливих і нестисливих тіл виражаємо, як і в [4], через розв'язки диференціального рівняння:

$$\left( \Delta_1 + \xi_1'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \left( \Delta_1 + \xi_2'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \left( \Delta_1 + \xi_3'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \Phi^{ik} = 0, \quad (4)$$

де  $\Delta_i = \partial^2 / \partial y_1^2 + \partial^2 / \partial y_2^2$ ,  $\xi_i'^2$  ( $i = 1, 2, 3$ ) – корені визначального рівняння (4), значення яких подані в працях [4; 5] для стисливих і нестисливих тіл.

Прийmemo функцію  $\Phi^{ik}$  у формі:

$$\Phi^1 = \Phi^2 = \Psi, \quad \Phi^3 = \tilde{\chi} \quad (5)$$

Причому для осесиметричних задач  $\Psi = 0$ , з [4], (4), (5) отримаємо:

$$\left( \Delta_1 + \xi_2'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \left( \Delta_1 + \xi_3'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \tilde{\chi} = 0. \quad (6)$$

Відзначимо, що для всіх потенціалів найпростішої структури у випадку стисливих і нестисливих тіл [4] усі величини  $\xi_i'^2$  ( $i = 1, 2, 3$ ) з (4) додатні (хоч це не є доказом загального положення). Одним із загальних обмежень на величини  $\xi_i'^2$  ( $i = 1, 2, 3$ ) є вимога, щоб розв'язок лінеаризованої задачі був єдиним (одне з основних припущень механіки контактної взаємодії).

Академік О.М. Гузем [4; –10] показав, що умовою існування єдиного розв'язку лінеаризованої теорії пружності для стисливих і нестисливих тіл є умова сильної еліптичності рівнянь (4):

$$\text{Re } \xi_i'^2 > 0; \quad \text{Im } \xi_i'^2 = 0, \quad i = 2, 3. \quad (7)$$

Ураховуючи (7), можливі два варіанти представлення загального розв'язку (4) або (6):

1) випадок рівних коренів ( $\xi_2'^2 = \xi_3'^2$ ) [4]:

$$\tilde{\chi} = \tilde{\chi}_1 + y_3 \tilde{\chi}_2, \left( \Delta_1 + \xi_2'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \tilde{\chi}_1 = 0, \left( \Delta_1 + \xi_2'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \tilde{\chi}_2 = 0; \quad (8)$$

2) випадок нерівних коренів ( $\xi_2'^2 \neq \xi_3'^2$ ) [4]:

$$\tilde{\chi} = \tilde{\chi}_1 + \tilde{\chi}_2, \left( \Delta_1 + \xi_2'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \tilde{\chi}_1 = 0, \left( \Delta_1 + \xi_3'^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2} \right) \tilde{\chi}_2 = 0. \quad (9)$$

Уведемо змінні:

$$\xi_1'^2 = n_3, \xi_2'^2 = n_1, \xi_3'^2 = n_2, \quad (10)$$

У системі кругових циліндричних координат  $(r, \theta, z_i)$  ( $i=1,2$ ), де  $z_i = v_i^{-1} y_3$ ,  $v_i = \sqrt{n_i}$ , ( $i=1,2$ ) випишемо загальні розв'язки в зручній формі для скінченного кільцевого тіла у випадку вісесиметричної його деформації відносно геометричної осі. Крім того, будемо вважати, що початкові (залишкові) напруження рівномірно діють уздовж координатних осей  $r, \theta$ , виконується умова однорідності початкових напружень.

Для випадків (8), (9) гармонічні функції  $\tilde{\chi}_i$  ( $i=1,2$ ) представимо у вигляді суми інших двох гармонічних функцій:

$$\tilde{\chi}_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12}, \quad (11)$$

$$\tilde{\chi}_2 = \Phi_{21} + \Phi_{22}, \quad (12)$$

які є розв'язками диференціального рівняння Лапласа [6; 7]:

$$\nabla^2 \Phi_{kj} = 0, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + v_i^2 \frac{\partial^2}{\partial y_3^2}, \quad (k, j, i=1,2). \quad (13)$$

Часткові розв'язки (11)–(12) диференціальних рівнянь (13) будемо шукати методом розділення змінних (методом Фур'є) [6; 7] у вигляді добутку:

$$\Phi_{lj} = R_{lj} Z_{lj}, \quad (l, j=1,2). \quad (14)$$

Знайдемо розв'язок  $\Phi_{11}$ :

$$\Phi_{11} = R_{11}(r) Z_{11}(y_3), \quad (15)$$

Підставимо (15) у (13) і поділимо на  $v_i^2 R_{11} Z_{11}$ , знайдемо:

$$\frac{R_{11}'' + \frac{1}{r} R_{11}'}{v_i^2 R_{11}} = - \frac{Z_{11}''}{Z_{11}} = \gamma_k^2, \quad (16)$$

де  $\gamma_k^2$  є власним значенням задачі (константою).

Одержимо такі рівняння:

$$R_{11}'' + r^{-1} R_{11}' - v_i^2 \gamma_k^2 R_{11} = 0, \quad Z_{11}'' + \gamma_k^2 Z_{11} = 0, \quad (17)$$

Перше рівняння (17) є рівнянням Бесселя [6; 7], розв'язок якого запишемо у вигляді:

$$R_{11}(r) = A_k^{(1)} I_0(\gamma_k v_i r) + B_k^{(1)} K_0(\gamma_k v_i r), \quad (i=1,2), \quad (18)$$

де  $I_v(\gamma_k v_i r)$  – функція Бесселя уявного аргументу,  $K_v(x)$  – функція Макдональда,  $A_k^{(1)}$ ,  $B_k^{(1)}$  – сталі величини, що визначаються враховуючи граничні умови конкретної контактної задачі.

Для циліндричних тіл варто зробити зауваження, що розв'язок першого рівняння (13) повинен бути обмеженим при  $r=0$ , тоді константу  $B_k^{(1)}$  потрібно прирівняти до нуля, так як  $K_0(0) = \infty$ . Для кільцевих тіл цього робити не будемо.

Друге рівняння (17) є звичайним диференціальним рівнянням зі сталими коефіцієнтами, розв'язок якого має вигляд:

$$Z_{11}(\gamma_k v_1 z_1) = C_k \sin(\gamma_k v_1 z_1) + D_k \cos(\gamma_k v_1 z_1), \quad (19)$$

де  $C_k, D_k$  – сталі величини, що визначаються з граничних умов конкретної контактної задачі.

Щоб розв'язок (19) задовольняв конкретні граничні умови задач, розв'язують задачу Штурма-Ліувілля [6; 7] і знаходять  $\gamma_k^2$ . Звідси:

$$\Phi_{11} = (A_k^{(1)} I_0(\gamma_k v_i r) + B_k^{(1)} K_0(\gamma_k v_i r)) S_1(\gamma_k v_i z_i), \quad (i = 1, 2), \quad (20)$$

де  $S_1(\gamma_k v_i z_i) = C_k \sin(\gamma_k v_i z_i) + D_k \cos(\gamma_k v_i z_i), \quad (i = 1, 2)$ .

Функцію  $\Phi_{12}$  знаходимо аналогічно, як і для (15), лише (16) матиме вигляд:

$$\frac{R_{12}'' + \frac{1}{r} R_{12}}{v_i^2 R_{12}} = -\frac{Z_{12}''}{Z_{12}} = -\alpha_k^2, \quad (21)$$

де  $\alpha_k^2$  – ще одне власне значення задачі (стала величина).

Опускаючи викладки (17)–(19), одержимо:

$$\Phi_{12} = (T_k^{(1)} J_0(\alpha_k r) + T_k^{(2)} Y_0(\alpha_k r)) S_2(\alpha_k z_i), \quad (i = 1, 2), \quad (22)$$

де  $J_v(x)$  – функція Бесселя дійсного аргументу,  $Y_v(x)$  – функція Неймана,  $S_2(\alpha_k z_i) = E_k sh(\alpha_k z_i) + F_k ch(\alpha_k z_i), \quad (i = 1, 2), T_k^{(1)}, T_k^{(2)}$  – сталі величини, що визначаються з граничних умов конкретної контактної задачі.

Аналогічно знаходимо розв'язки для решти функцій (14).

Також для задоволення граничних умов контактних задач лінеаризованої теорії пружності необхідно підібрати ще простішу гармонійну функцію. Таку функцію підберемо у вигляді:

$$\tilde{\chi}_i = A_0(r^2 - 2z_i^2) + C_0 z_i(3r^2 - 2z_i^2). \quad (23)$$

де  $A_0, C_0$  – сталі величини, що визначаються з граничних умов конкретної контактної задачі,  $i = 1$ , для випадку рівних коренів (8), а для випадку нерівних коренів (9)  $i = 1, 2$ .

Отже, ураховуючи (23), можемо констатувати, що загальні розв'язки рівняння (6) для кільцевого тіла залежно від коренів (10) визначального рівняння (6) мають вигляд:

для рівних коренів  $n_1 = n_2$ :

$$\begin{aligned} \tilde{\chi}_1 &= A_0(r^2 - 2z_1^2) + C_0 z_1(3r^2 - 2z_1^2) + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \{ [A_k^{(1)} I_0(\gamma_k v_1 r) + A_k^{(2)} K_0(\gamma_k v_1 r)] S_1(\gamma_k v_1 z_1) + [T_k^{(1)} J_0(\alpha_k r) + T_k^{(2)} Y_0(\alpha_k r)] S_2(\alpha_k z_1) \}, \\ \tilde{\chi}_2 &= A_0(r^2 - 2z_1^2) + C_0 z_1(3r^2 - 2z_1^2) + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \{ [B_k^{(1)} I_0(\gamma_k v_1 r) + B_k^{(2)} K_0(\gamma_k v_1 r)] S_1(\gamma_k v_1 z_1) + [W_k^{(1)} J_0(\alpha_k r) + W_k^{(2)} Y_0(\alpha_k r)] S_3(\alpha_k z_1) \}, \end{aligned} \quad (24)$$

де  $W_k^{(1)}, W_k^{(2)}$  – сталі величини, що визначаються з граничних умов конкретної контактної задачі,  $S_3(\alpha_k z_1) = N_k sh(\alpha_k z_1) + M_k ch(\alpha_k z_1)$ .

Загальний розв'язок (8) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{\chi} &= (1 + v_1 z_1) [A_0(r^2 - 2z_1^2) + C_0 z_1(3r^2 - 2z_1^2)] + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \{ [(A_k^{(1)} + v_1 z_1 B_k^{(1)}) I_0(\gamma_k v_1 r) + (A_k^{(2)} + v_1 z_1 B_k^{(2)}) K_0(\gamma_k v_1 z_1)] S_1(\gamma_k v_1 z_1) + \\ &+ [T_k^{(1)} J_0(\alpha_k r) + T_k^{(2)} Y_0(\alpha_k r)] S_2(\alpha_k z_1) + v_1 z_1 [W_k^{(1)} J_0(\alpha_k r) + W_k^{(2)} Y_0(\alpha_k r)] S_3(\alpha_k z_1) \}. \end{aligned} \quad (25)$$

де  $W_k^{(1)}, W_k^{(2)}$  – сталі величини, що визначаються з граничних умов конкретної контактної задачі,  $S_3(\alpha_k z_1) = N_k sh(\alpha_k z_1) + M_k ch(\alpha_k z_1)$ .

Для нерівних коренів  $n_1 \neq n_2$ :

$$\begin{aligned} \tilde{\chi}_1 &= A_0(r^2 - 2z_1^2) + C_0 z_1(3r^2 - 2z_1^2) + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \{ [A_k^{(1)} I_0(\gamma_k v_1 r) + A_k^{(2)} K_0(\gamma_k v_1 r)] S_1(\gamma_k v_1 z_1) + [T_k^{(1)} J_0(\alpha_k r) + T_k^{(2)} Y_0(\alpha_k r)] S_2(\alpha_k z_1) \}, \\ \tilde{\chi}_2 &= A_0(r^2 - 2z_2^2) + C_0 z_2(3r^2 - 2z_2^2) + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \{ [B_k^{(1)} I_0(\gamma_k v_2 r) + B_k^{(2)} K_0(\gamma_k v_2 r)] S_1(\gamma_k v_2 z_2) + [W_k^{(1)} J_0(\alpha_k r) + W_k^{(2)} Y_0(\alpha_k r)] S_3(\alpha_k z_2) \}. \end{aligned} \tag{26}$$

Загальний розв'язок (9) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{\chi} &= 2A_0(r^2 - z_1^2 - z_2^2) + C_0 (z_1(3r^2 - 2z_1^2) + z_2(3r^2 - 2z_2^2)) + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \{ [A_k^{(1)} I_0(\gamma_k v_1 r) + A_k^{(2)} K_0(\gamma_k v_1 r)] S_1(\gamma_k v_1 z_1) + [B_k^{(1)} I_0(\gamma_k v_2 r) + B_k^{(2)} K_0(\gamma_k v_2 r)] S_1(\gamma_k v_2 z_2) + \\ &+ [T_k^{(1)} J_0(\alpha_k r) + T_k^{(2)} Y_0(\alpha_k r)] S_2(\alpha_k z_1) + [W_k^{(1)} J_0(\alpha_k r) + W_k^{(2)} Y_0(\alpha_k r)] S_3(\alpha_k z_2) \}. \end{aligned} \tag{27}$$

Отже, побудовано загальні аналітичні розв'язки основного диференціального рівняння лінеаризованої теорії пружності (6) для стисливих і нестисливих тіл кільцевої форми з довільним контуром поперечного перерізу.

**Числовий розв'язок**

На прикладі розв'язку контактної задачі про тиск пружного кільцевого штампа на півпростір із початковими (залишковими) напруженнями [1] проведено числовий аналіз для потенціалу Трелоара при наступних значеннях параметрів:  $R_1 = 1 \cdot 10^{-2}$  м,  $R_2 = 2 \cdot 10^{-2}$  м,  $H = 1 \cdot 10^{-1}$  м,  $\lambda_1 = 0.7; 0.8; 0.9; 1; 1.1; 1.2; 1.3$ , де  $R_1 \leq r \leq R_2$ ,  $R_1$  – внутрішній радіус кільцевого штампа,  $R_2$  – зовнішній радіус кільцевого штампа,  $H$  – висота кільцевого штампа.

Алгоритм розв'язку реалізовано у вигляді програми у пакеті Maple 17.

На рис. 1 представлено розподіл контактної переміщення  $-\frac{1}{\epsilon R_2} \tilde{U}_r^{(1)}$  під кільцевим

штампом на межі контакту в безрозмірних координатах, де пунктирна крива відповідає кільцевому циліндру без початкових напружень ( $\lambda_1 = 1$ ), а суцільна – з початковими напруженнями.

На рис. 2 представлено напруження  $\frac{1}{P} \tilde{Q}_{3r}^{(1)}$  при різних значеннях  $z_1$ .

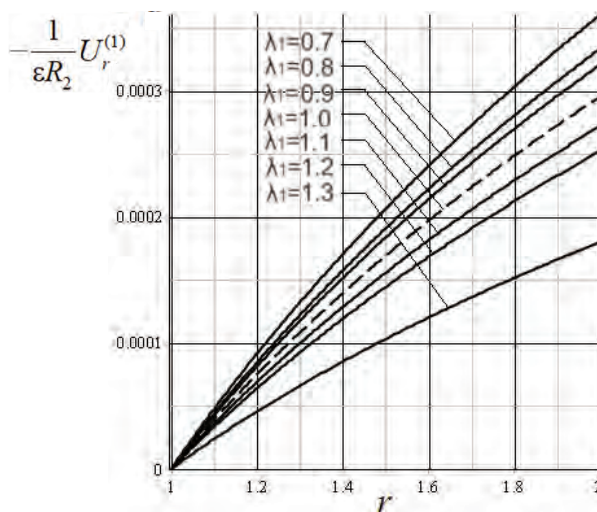


Рис. 1. Контактні переміщення  $-\frac{1}{\epsilon R_2} \tilde{U}_r^{(1)}$  під кільцевим штампом



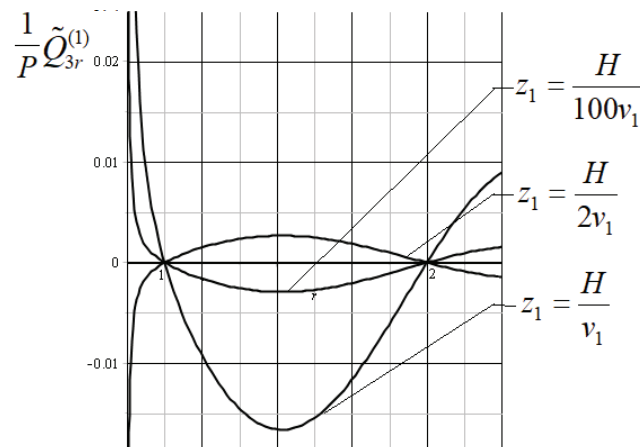


Рис. 2. Напруження  $\frac{1}{P} \tilde{Q}_{3r}^{(1)}$  в кільцевому штампі

### Висновки

У статті в загальному вигляді побудовано аналітичні розв’язки основного диференціального рівняння лінеаризованої теорії пружності для стисливих і нестисливих тіл кільцевої форми з довільним контуром поперечного перерізу з урахуванням при цьому умови існування єдиного розв’язку (7). Розв’язки кільцевих тіл представлено у двох випадках: 1) для рівних коренів рівняння (6); 2) для нерівних коренів рівняння (6).

На прикладі розв’язку контактної задачі про тиск пружного кільцевого штампа на пружний півпростір із початковими (залишковими) напруженнями [1] проведено чисельний аналіз, який представлений у вигляді графіків у безрозмірних координатах з метою ілюстрації напружень і контактних переміщень у кільцевому штампі.

З графіків видно, що при сталому зовнішньому навантаженні початкові напруження впливають на основні контактні характеристики кільцевого штампа. Таким чином, отримані результати можуть бути використані для дослідження низки інших контактних задач, у яких попередньо напружені кільцеві штампи взаємодіють із пружними або жорсткими тілами.

### Список використаної літератури

1. Babych S.Y., Yarets'ka N.O. Contact Problem for an Elastic Ring Punch and a Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*. 2021. Vol. 57. № 3. P. 297–305. doi: 10.1007/s10778-021-01081-7
2. Yaretskaya N.A. Contact Problem for the Rigid Ring Stamp and the Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*. 2018. Vol. 54. № 5. P. 539–543. doi: 10.1007/s10778-018-0906-y
3. Габрусєва І.Ю., Шелєстовський Б.Г. Контактна взаємодія кільцевого штампа з попередньо напруженим ізотропним шаром. *Вісник Математичні методи та фізико-механічні поля*. 2011. Том 54. № 3. С. 138–146.
4. Guz A.N., Rudnitsky V.B. Fundamentals of the contact interaction theory of elastic bodies with initial (residual) stresses : монографія. Хмельницький : Вид. ПП Мельник, 2006. 710 с.
5. Yaretska N.O. Mathematical model and solution of spatial contact problem for prestressed cylindrical punch and elastic layer. *Innovative paradigm of the development of modern physical-mathematical sciences* : collective monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2022. P. 261–295. doi: 10.30525/978-9934-26-200-5-10
6. Бобик О.І., Бобик І.О., Литвин В.В. Рівняння математичної фізики : навчальний посібник. Львів : Новий світ-2000, 2010. 256 с.

7. Перестюк М.О., Маринець В.В. Теорія рівнянь математичної фізики: підручник. Київ : Либідь, 2006. 424 с.
8. Guz A.N., Babich S.Y., Rudnitskii V.B. Contact problems for elastic bodies with initial stresses: Focus on Ukrainian research. *Int. Appl. Mech. Rew.* 1998. Vol. 51. № 5. P. 343–371. doi: 10.1115/1.3099009
9. Гузь О.М., Бабич С.Ю., Рудницький В.Б. Контактна взаємодія тіл з початковими напруженнями : навчальний посібник. Київ : Вища школа, 1995. 304 с.
10. Guz A.N. Nonclassical Problems of Fracture/Failure Mechanics: On the Occasion of the 50th Anniversary of Research (Review). *International Applied Mechanics*. 2019. Vol. 55. № 4. P. 343–415. doi: 10.1007/s10778-019-00960-4

### References

1. Babych, S.Y. & Yarets'ka, N.O. (2021). Contact Problem for an Elastic Ring Punch and a Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*. Vol. 3. P. 297–305. doi: 10.1007/s10778-021-01081-7 [in English]
2. Yaretskaya, N.A. (2018). Contact Problem for the Rigid Ring Stamp and the Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*. Vol. 5. P. 539–543. doi: 10.1007/s10778-018-0906-y [in English]
3. Habrusieva, I.Yu. & Shelestovskyi, B.H. (2011). Kontaktna vzaiemodiia kiltsevoho shtampa z poperedno napruzhenym izotropnym sharom – [Contact interaction of a ring die with a prestressed isotropic layer]. *Visnyk Matematychni metody ta fizyko-mekhanichni polia*. Vol. 3. P. 138–146. [in Ukrainian]
4. Guz, A.N. & Rudnitsky, V.B. (2006). Fundamentals of the contact interaction theory of elastic bodies with initial (residual) stresses. Khmelnytskyi : Vyd. PP Melnyk. [in English]
5. Yaretska, N.O. (2022). Mathematical model and solution of spatial contact problem for prestressed cylindrical punch and elastic layer. *Innovative paradigm of the development of modern physical-mathematical sciences*. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”. P. 261–295. doi:10.30525/978-9934-26-200-5-10 [in English]
6. Bobyk, O.I., Bobyk, I.O. & Lytvyn, V.V. (2010). Rivniannia matematychnoi fizyky – [Equations of mathematical physics]. Lviv : Novyi svit-2000. [in Ukrainian]
7. Perestiuk M.O. & Marynets V.V. (2006). Teoriia rivnian matematychnoi fizyky – [Theory of mathematical physics equations]. Kyiv : Lybid. [in Ukrainian]
8. Guz A.N., Babich S.Y. & Rudnitskii V.B. (1998). Contact problems for elastic bodies with initial stresses: Focus on Ukrainian research. *Int. Appl. Mech. Rew.* Vol. 5. P. 343–371. doi: 10.1115/1.3099009 [in English]
9. Huz, O.M., Babych S.Iu. & Rudnytskyi V.B. (1995). Kontaktna vzaiemodiia til z pochatkovymy napruzheniamy – [Contact interaction of bodies with initial stresses]. Kyiv : Vyscha shkola. [in Ukrainian]
10. Guz. A.N. (2019). Nonclassical Problems of Fracture/Failure Mechanics: On the Occasion of the 50th Anniversary of Research (Review). *International Applied Mechanics*. Vol. 4. P. 343–415. doi: 10.1007/s10778-019-00960-4 [in English]

Ярецька Наталія Олександрівна – к.ф.-м.н., доцент кафедри вищої математики та комп'ютерних застосувань Хмельницького національного університету, e-mail: massacran2@ukr.net, yaretskano@khmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3726-2878.

Рамський Андрій Олександрович – к.ф.-м.н., доцент, завідувач кафедри вищої математики та комп'ютерних застосувань Хмельницького національного університету, e-mail: ramsky@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9624-5018.

Мороз Володимир Вікторович – старший викладач кафедри соціально-гуманітарної підготовки Хмельницького кооперативного торговельно-економічного інституту, e-mail: morozvv2008@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4511-1084.

Yaretska Nataliia Oleksandrivna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D.), Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Computer Applications of the Khmelnytskyi National University, e-mail: massacran2@ukr.net, yaretskano@khnmu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4107-8141.

Ramskyi Andrii Oleksandrovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics and Computer Applications of the Khmelnytskyi National University, e-mail: ramsky@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9624-5018.

Moroz Volodymyr Viktorovych – Senior Lecturer at the Department of Social and Humanitarian Training of Khmelnytskyi Cooperative Trade and Economic Institute, e-mail: morozvv2008@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4511-1084.

# ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Технічний редактор

Литвиненко Олена Іванівна  
к.т.н., доцент

Верстка

Ігор Стратій

Здано до набору 12.10.2023 р. Підписано до друку 23.10.2023 р.  
Гарнітура Times New Roman. Формат 60×84/8.  
Друк офсетний. Папір офсетний.  
Ум. друк. арк. 18,14. Зам. № 1123/676. Наклад 100 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»  
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1  
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08  
E-mail: mailbox@helvetica.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК No 7623 від 22.06.2022 р.