

Міністерство освіти і науки України

Херсонський національний технічний університет

ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Т. 3, № 2.1

Рекомендовано до друку Вченою радою
Херсонського національного технічного університету
(протокол № 8 від 29 червня 2020 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 Journal Master List,
CiteFactor Academic Scientific Journals, National Library of Ukraine (Vernadsky).

Херсон 2020

Редакційна рада

Головний редактор

Тулученко Г.Я.

д.т.н., професор, завідувач кафедри вищої математики і математичного моделювання Херсонського національного технічного університету.

Заступники головного редактора

Розов Ю.Г.

д.т.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України, перший проректор Херсонського національного технічного університету.

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.

Відповідальний секретар

Омельчук А.А.

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

Члени редакційної колегії за спеціальностями:

Іноземні фахівці

Бабічев С.А.

д.т.н., доцент, (Чехія)

Гучек П.Й.

д.т.н., доцент, (Польща)

113 – Прикладна математика

Андрейцев А.Ю.

к.ф.-м.н., доцент

Астіоненко І.О.

к.ф.-м.н., доцент

Гвоздева І.М.

д.т.н., професор

Гнатушенко Вікт.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

122 – 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
Найдиш А.В.	д.т.н., професор
Несвідомін В.М.	д.т.н., професор
Пилипака С.Ф.	д.т.н., професор
Тулученко Г.Я.	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
Бардачов Ю.М.	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
Рожков С.О.	д.т.н., професор
Рудакова Г.В.	д.т.н., професор

Інші спеціальності

Мельник І.В.	д.т.н., професор
Розов Ю.Г.	д.т.н., професор

ISSN 2618-0332

Министерство образования и науки Украины

Херсонский национальный технический университет

ПРИКЛАДНЫЕ ВОПРОСЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Т. 3, № 2.1

Рекомендовано к печати Ученым советом
Херсонского национального технического университета
(протокол № 8 от 29 июня 2020 года)

Журнал включен в Реестр научных специализированных изданий Украины
категории Б на основании Приказа МОН Украины от 17 марта 2020 года № 409.

Журнал включен в наукометрические базы, электронные библиотеки и репозитории:
Google Scholar, Index Copernicus International Journal Master List,
CiteFactor Academic Scientific Journals, National Library of Ukraine (Vernadsky).

Херсон 2020

Редакционный совет

Главный редактор

Тулученко Г.Я.

д.т.н., профессор, заведующая кафедрой высшей математики и математического моделирования Херсонского национального университета.

Заместители главного редактора

Розов Ю.Г.

д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, первый проректор Херсонского национального технического университета.

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, профессор кафедры интеллектуальных информационных систем Черноморского национального университета им. П. Могилы.

Ответственный секретарь

Омельчук А.А.

к.т.н., доцент кафедры интеллектуальных управляющих и вычислительных систем Университета государственной фискальной службы Украины (г. Ирпень, Киевская обл.)

Члены редакционной коллегии по специальностям:

Иностранные специалисты

Бабичев С.А.

д.т.н., доцент, (Чехия)

Гучек П.И.

д.т.н., доцент, (Польша)

113 – Прикладная математика

Андрейцев А.Ю.

к.ф.-м.н., доцент

Астионенко И.А.

к.ф.-м.н., доцент

Гвоздева И.М.

д.т.н., профессор

Гнатушенко Викт.В.

д.т.н., доцент

Ляшенко В.П.

д.т.н., профессор

Миргород В.Ф.

д.т.н., доцент

Ризнык В.В.

д.т.н., профессор

Стрельникова Е.А.

д.т.н., профессор

Хомченко А.Н.

д.ф.-м.н., профессор

122 – Компьютерные науки

Борисенко В.Д.	д.т.н., профессор
Ванин В.В.	д.т.н., профессор
Вирченко Г.А.	д.т.н., профессор
Гнатушенко В.В.	д.т.н., профессор
Гумен Е.Н.	д.т.н., профессор
Корчинский В.М.	д.т.н., профессор
Литвиненко В.И.	д.т.н., профессор
Мартин Е.В.	д.т.н., профессор
Найдыш А.В.	д.т.н., профессор
Несвидомин В.Н.	д.т.н., профессор
Пилипака С.Ф.	д.т.н., профессор
Тулученко Г.Я.	д.т.н., профессор
Устенко С.А.	д.т.н., профессор
Шоман О.В.	д.т.н., профессор

126 – Информационные системы и технологии

Аль-Аммори А.Н.	д.т.н., профессор
Баклан И.В.	к.т.н., доцент
Бень А.П.	к.т.н., доцент
Левыкин В.М.	д.т.н., профессор
Литвиненко Е.И.	к.т.н., доцент
Мороз Б.И.	д.т.н., профессор
Стеценко И.В.	д.т.н., профессор
Шерстюк В.Г.	д.т.н., профессор

151 – Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии

Алексеев М.А.	д.т.н., профессор
Бардачев Ю.Н.	д.т.н., профессор
Головко В.И.	д.т.н., профессор
Кондратец В.А.	д.т.н., профессор
Мещеряков Л.И.	д.т.н., профессор
Омельчук А.А.	к.т.н.
Осадчий С.И.	д.т.н., профессор
Рожков С.А.	д.т.н., профессор
Рудакова А.В.	д.т.н., профессор

Другие специальности

Мельник И.В.	д.т.н., профессор
Розов Ю.Г.	д.т.н., профессор

ISSN 2618-0332

Ministry of Education and Science of Ukraine

Kherson National Technical University

APPLIED QUESTIONS OF MATHEMATICAL MODELLING

V. 3, № 2.1

Recommended for publication by the Academic Council of
Kherson National Technical University
(Minutes № 8 on 29th June 2020)

The journal is included in the Register of scientific specialized publications of Ukraine of category B on the basis of Minutes of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated March 17, 2020 № 409.

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

Kherson 2020

Editorial Board

Editor-in-Chief

Tuluchenko H.Ya.

Professor, Doctor of Engineering Science, Head of the Department of Higher Mathematics and Mathematical Modelling of Kherson National Technical University.

Deputies Editor-in-Chief

Rozov Yu.H.

Doctor of Engineering Science, Professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, First Vice-Rector of Kherson National Technical University.

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.

Executive Secretary

Omelchuk A.A.

Ph.D., Associate Professor at the Department of Intelligent Control and Computing Systems of University of State Fiscal Service of Ukraine (Irpin, Kyiv region).

Members of Editorial Board by specialities:

Foreign Specialists

Babichev S.A.

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

Guchek P.Y.

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

113 – Applied Mathematics

Andreytsev A.Yu.

Ph.D., Associate Professor

Astionenko I.O.

Ph.D., Associate Professor

Hvozdeva I.M.

Doctor of Engineering Science, Professor

Hnatushenko Vikt.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

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

126 – Information Systems and Technologies

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

151 – Automation and Computer Integrated Technologies

Aleksieiev M.O.	Doctor of Engineering Science, Professor
Bardachov Yu.M.	Doctor of Engineering Science, Professor
Holovko V.I.	Doctor of Engineering Science, Professor
Kondratets V.O.	Doctor of Engineering Science, Professor
Meshcheriakov L.I.	Doctor of Engineering Science, Professor
Omelchuk A.A.	Ph.D.
Osadchyi S.I.	Doctor of Engineering Science, Professor
Rozhkov S.O.	Doctor of Engineering Science, Professor
Rudakova H.V.	Doctor of Engineering Science, Professor

Other Specialties

Melnyk I.V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Rozov Yu.H.	Doctor of Engineering Science, Professor

Професору
Хомченко

Анатолію Никифоровичу

80 років

Вітаємо!



Відомому вченому, людині, що має заслужений авторитет у наукових колах України, талановитому педагогу, який за період своєї багаторічної педагогічної та наукової діяльності виховав цілу плеяду молодих вчених і створив власну наукову школу, опублікував велику кількість науково-дослідних праць як в Україні, так і за її межами, доктору фізико-математичних наук, професору Хомченку Анатолію Никифоровичу 7 вересня 2020 року виповнюється 80 років.

Анатолій Никифорович народився 7 вересня 1940 року у місті Миколаєві у родині службовців. У 1955 році, після закінчення семи класів середньої школи, вступив до технікуму залізничного транспорту. У 1959-1962 рр проходив службу у лавах Радянської Армії. Після демобілізації, у тому ж році Анатолій Никифорович вступив до Одеського державного університету на механіко-математичний факультет.

Багаторічну педагогічну діяльність Анатолій Никифорович розпочав у 1965 році у технікумі залізничного транспорту в м. Миколаєві викладачем теоретичної механіки. З 1968 року працював викладачем кафедри вищої математики Миколаївського кораблебудівного інституту (МКІ). У 1969 році він вступив до аспірантури, після закінченні якої 4 січня 1973 року успішно захистив у Саратовському політехнічному інституті кандидатську дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 01.023 – теорія пружності та пластичності на тему: "Деякі питання коливань та прогинів ортотропних оболонок під дією локалізованих навантажень". З

1975 року Анатолій Никифорович – доцент кафедри вищої математики Івано-Франківського інституту нафти і газу (ІФІНГ). 28 лютого 1991 року Анатолій Никифорович захищає у Казанському державному університеті докторську дисертацію на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла на тему: "Дискретні моделі та ймовірнісні схеми у механіці тіл, що деформуються ". Ідеї, викладені у дисертаційній роботі, стали основою його наукових досліджень на наступні роки.

У 1993 році Хомчено А.Н. очолює кафедру прикладної математики та математичного моделювання Херсонського індустріального інституту. Це була одна із перших в Україні кафедр із такою назвою, після чого цю ініціативу підхопили інші вищі навчальні заклади України.

З 2012 року Анатолій Никифорович живе у місті Миколаїв і працює у Чорноморському національному університеті ім. П. Могили. До жовтня 2019 року він очолював кафедру прикладної і вищої математики, а з листопада 2019 року працює професором кафедри інтелектуальних інформаційних систем ЧНУ ім. П. Могили.

Людина дивовижної життєвої сили та енергії, Анатолій Никифорович пройшов усі сходинки становлення як вчений та педагог. Його вирізняють надзвичайна доброзичливість та увага до аспірантів і молодих вчених. У професора багато учнів, яких він увів у науковий світ: 16 із них стали кандидатами наук, 3 – докторами наук. Учений перебуває у постійному русі, генерує все нові і нові наукові ідеї. У його арсеналі понад чотириста наукових публікацій.

Анатолій Никифорович як для студентів, так і для колег є прикладом відповідального ставлення до справи і наукової допитливості, вражає енциклопедична глибина його знань у області історії математики, біографій вчених-математиків та бібліографії, що робить його лекції надзвичайно цікавими та пізнавальними.

Улюбленим дітищем Анатолія Никифоровича стала міжнародна конференція з математичного моделювання, яка проводиться у ХНТУ під його керівництвом з 1996 року.

За вагомий внесок у розвиток науки та вищої освіти у нашій країні 15 серпня 2000 року професор Хомченко А.Н. був нагороджений почесним знаком "Відмінник освіти України", а у 2003 році наказом Президента України № 1136 від 2 жовтня йому присвоєно почесне звання "Заслужений діяч науки і техніки України".

Анатолія Никифоровича вирізняють чудові людські чесноти: порядність, працьовитість, відповідальність, делікатність, скромність.

Колеги, учні і друзі від усієї душі вітають Улюбленого Вчителя, Шановного Колегу і просто Чудову Людину з прекрасним Ювілеєм. Бажають йому міцного здоров'я, творчих успіхів та нових наукових досягнень.

Оргкомітет МКММ-2020

Редакційна колегія журналу ППММ

ЗМІСТ

БЛАЖЕВСЬКИЙ С.Г., ЛЕНЮК О.М., НІКІТІНА О.М., ШИНКАРИК М.І. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕТОДОМ ГІБРИДНОГО ІНТЕГРАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ТИПУ БЕССЕЛЯ-ЕЙЛЕРА-БЕССЕЛЯ НА ПОЛЯРНІЙ ОСІ	18
БРАІЛОВ О.Ю., ПАНЧЕНКО В.І. КОМБІНОВАНА ГЕОМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ В ОПТИМІЗАЦІЙНОМУ ПІДХОДІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НЕДОСТУПНОЇ ТОЧКИ ОБ'ЄКТА	27
ВАЛЬКО Н.В., БОЛГАРІН Т.О., ВАЛЬКО К.В. АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХУ ДЛЯ АВТОНОМНОГО РУХУ БЕЗПЛОТНОГО ТРАНСПОРТУ ПО ЛІНІЇ	39
ВАХНЕНКО В.О., ВЕНГРОВИЧ Д.Б., МІЩЕНКО О.В. ДІАГНОСТИКА СТРУКТУРОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА ДОВГИМИ НЕЛІНІЙНИМИ ХВИЛЯМИ: ТЕОРЕТИЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ	49
ВОРОНЕНКО С.В., СУББОТІН О.В., ЛЕБЕДЕНКО Ю.О., РУДАКОВА Г.В. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СУДНОВОЮ КОМПЛЕКСНОЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ ТУРБОКОМПРЕСОРНОЮ УСТАНОВКОЮ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ	60
ГАЛЬЧЕНКО А.В., ЧОПОРОВ С.В. КОДУВАННЯ ДАНИХ В АЛГОРИТМАХ ЗАПЕРЕЧУВАННОГО ШИФРУВАННЯ	72
МИРГОРОД В.Ф., ГВОЗДЕВА І.М., ЛЕЩЕНКО В.В., ТУМОЛЬСКИЙ А.П., А.Г. КАЛУЄВ ПРОБЛЕМИ АЕРОДИНАМІЧНОЇ СТАЛОСТІ І МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРНОГО ТИПУ	80
ГРИЦИК В.В. ДОСЛІДЖЕННЯ УНІФІКАЦІЇ СТАНДАРТНИХ ПОРОГОВИХ МЕТОДІВ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ	88
ЄВГРАШКІНА Г.П., ХАРИТОНОВ М.М. ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗ СОЛЬОВИХ РЕЖИМІВ ЗРОШУВАНИХ ЗЕМЕЛЬ В АРІДНИХ РЕГІОНАХ	99
КАГАДІЙ Т.С., ШПОРТА А.Г., БІЛОВА О.В., ЩЕРБИНА І.В. НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ШАРУВАТОЇ ОСНОВИ З ПІДКРІПЛЮЮЧИМ ЕЛЕМЕНТОМ	107
КАШТАН В.Ю., ГНАТУШЕНКО В.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗЛИТТЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ВИСОКОГО ПРОСТОРОВОГО РОЗРІЗНЕННЯ	117
КЛОЧАН А.С. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ПОСАДКИ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН	128
КОВИЛІН Є.Р., ВОЛКОВСЬКИЙ О.С. КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦІЇ ВІДПОВІДЕЙ У ПОШУКОВІЙ СИСТЕМІ НА ОСНОВІ НЕСТРУКТУРОВАНОЇ БАЗИ ЗНАНЬ	142
КОРЧИНСЬКИЙ В.М., СВИНАРЕНКО Д.М. ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ТА РАДІОМЕТРИЧНОГО РОЗРІЗНЕННЯ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ НА ОСНОВІ ЇХ АНАЛІТИЧНИХ СИГНАЛІВ	156
КУЗЬМИЧ В.І., КУЗЬМИЧ Л.В., САВЧЕНКО О.Г. МОДЕЛЮВАННЯ ПРЯМОЛІНІЙНОГО ТА ПЛОСКОГО РОЗМІЩЕННЯ ТОЧОК МЕТРИЧНОГО ПРОСТОРУ	165
МИХАЙЛУЦА О.М., ПОЖУЄВ А.В. ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В НАВЧАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ВИКЛАДАННЯ ЖИВОПИСУ	174
МИРГОРОД В.Ф., ГВОЗДЕВА І.М. ОЦІНКА ПОТУЖНОСТІ ДЕЯКИХ НЕПАРАМЕТРИЧНИХ КРИТЕРІЇВ ТРЕНДУ	184
ОСАДЧИЙ С.І., ДЯЧЕНКО М.М. ЗБІР ТА ПЕРВИННА ОБРОБКА ДАНИХ З СИСТЕМИ ARDUPILOT ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ КВАДРОКОПТЕРУ	197
ОСАДЧУК О.В., КРИЛИК Л.В., ОСАДЧУК Я.О. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ	206
ПРОЛІСКО Е.Е., ШУТЬ В.Н., КОЗИНСЬКИЙ А.А. УПРАВЛІННЯ ПЕРЕВІЗНИМ ПРОЦЕСОМ В МІСЬКІЙ ПАСАЖИРСЬКІЙ ТРАНСПОРТНІЙ СИСТЕМІ	216
РЕДЧИЦЬ Д.О., ТАРАСОВ С.В., ТАРАСОВ А.С., МОІСЕЄНКО С.В. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПОТОКІВ ХОЛОДНОЇ ПЛАЗМИ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ	224
РОЖКОВ С.О., ХЛОПЕНКО М.Я., ТИМОФЕЄВ К.В., ТЕРНОВА Т.І., СОКОЛОВ А.С. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ТЕОРІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ. МЕТОДИ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ ПРИ АНАЛІЗІ СЦЕНИ	235
СОКОЛОВА Н.О., БЄЛОВ А.С. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІoT-СИСТЕМИ НА АПАРАТНІЙ ПЛАТФОРМІ ARDUINO	251
СТЕГАНЦЕВ Є.В. КЛАСИФІКАЦІЯ КРИВИХ ДРУГОГО ПОРЯДКУ ЗА ЇХ ПРООБРАЗАМИ ПРИ СТЕРЕОГРАФІЧНІЙ ПРОЕКЦІЇ	260

ТРОХИМЧУК П.П. МОДЕЛЮВАННЯ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНОГО ОПТИЧНОГО ПРОБОЮ В ТВЕРДИХ ТІЛАХ	269
УСОВ А.В., СІКІРАШ Ю.Є. МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ ВИРОБІВ ІЗ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ	280
ЧОПОРОВА О.В., ЛІСНЯК А.О. ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КВАДРАТНОЇ ПЛАСТИНКИ	290
ЯРЕЦКА Н.О., РАМСЬКИЙ А.О. ВПЛИВ ПОЧАТКОВИХ НАПРУЖЕНЬ НА КОНТАКТНУ ВЗАЄМОДІЮ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ЦІЛЬЦЕВОГО ШТАМПА ТА ПІВПРОСТОРУ	300

СОДЕРЖАНИЕ

БЛАЖЕВСКИЙ С.Г., ЛЕНИУК О.М., НИКИТИНА О.М., ШИНКАРИК Н.И. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ГИБРИДНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТИПА БЕССЕЛЯЭЙЛЕРА-БЕССЕЛЯ НА ПОЛЯРНОЙ ОСИ	18
БРАИЛОВ А.Ю., ПАНЧЕНКО В.И. КОМБИНИРОВАННАЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ОПТИМИЗАЦИОННОМ ПОДХОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕДОСТУПНОЙ ТОЧКИ ОБЪЕКТА	27
ВАЛЬКО Н.В., БОЛГАРИН Т.А., ВАЛЬКО К.В. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПУТИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТА ПО ЛИНИИ	39
ВАХНЕНКО В.А., ВЕНГРОВИЧ Д.Б., МИЩЕНКО А.В. ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРИРОВАННОЙ СРЕДЫ ДЛИННЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЛНАМИ: ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ	49
ВОРОНЕНКО С.В., СУББОТИН А.В., ЛЕБЕДЕНКО Ю.А., РУДАКОВА А.В. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТУРБОКОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ	60
ГАЛЬЧЕНКО А.В., ЧОПОРОВ С.В. КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ В АЛГОРИТМАХ ОТРИЦАЕМОГО ШИФРОВАНИЯ	72
МИРГОРОД В.Ф., ГВОЗДЕВА И.М., ЛЕЩЕНКО В.В., ТУМОЛЬСКИЙ А.П., КАЛУЕВ А.Г. ПРОБЛЕМЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРНОГО ТИПА	80
ГРИЦИК В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ УНИФИКАЦИИ СТАНДАРТНЫХ ПОРОГОВЫХ МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ	88
ЕВГРАШКИНА Г.П., ХАРИТОНОВ Н.Н. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ СОЛЕВЫХ РЕЖИМОВ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ В АРИДНЫХ РЕГИОНАХ	99
КАГАДИЙ Т.С., ШПОРТА А.Г., БЕЛОВА О.В., ЩЕРБИНА И.В. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СЛОИСТОГО ОСНОВАНИЯ С ПОДКРЕПЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ	107
КАШТАН В.Ю., ГНАТУШЕНКО В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СЛИЯНИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ	117
КЛОЧАН А.Е. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ	128
КОВЫЛИН Е.Р., ВОЛКОВСКИЙ О.С. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ОТВЕТОВ В ПОИСКОВОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ	142
КОРЧИНСКИЙ В.М., СВИНАРЕНКО Д.Н. ПОВЫШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО И РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙДИСТАНЦИОННОГО ОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ	156
КУЗЬМИЧ В.И., КУЗЬМИЧ Л.В., САВЧЕНКО А.Г. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО И ПЛОСКОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК МЕТРИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА	165
МИХАЙЛУЦА Е.Н., ПОЖУЕВ А.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЧЕБНОЙ СИСТЕМЕ ПРЕПОДАВАНИЯ ЖИВОПИСИ	174
МИРГОРОД В.Ф., ГВОЗДЕВА И.М. ОЦЕНКА МОЩНОСТИ НЕКОТОРЫХ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ТРЕНДА	184
ОСАДЧИЙ С.И., ДЯЧЕНКО М.Н. СБОР И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИЗ СИСТЕМЫ ARDURILOT ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ КВАДРОКОПТЕРА	197
ОСАДЧУК А.В., КРИЛИК Л.В., ОСАДЧУК Я.А. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ	206
ПРОЛИСКО Е.Е., ШУТЬ В.Н., КОЗИНСКИЙ А.А. УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ В ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ	216
РЕДЧИЦ Д.А., ТАРАСОВ С.В., ТАРАСОВ А.С., МОИСЕЕНКО С.В. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ	224
РОЖКОВ С.А., ХЛОПЕНКО Н.Я., ТИМОФЕЕВ К.В., ТЕРНОВАЯ Т.И., СОКОЛОВ А.Е. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ	235

СОКОЛОВА Н.О., БЕЛОВ А.С. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ IoT-СИСТЕМЫ НА АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЕ ARDUINO.....	251
СТЕГАНЦЕВ Е.В. КЛАССИФИКАЦИЯ КРИВЫХ ВТОРОГО ПОРЯДКА ПО ИХ ПРООБРАЗАМ ПРИ СТЕРЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ	260
ТРОХИМЧУК П.П. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ	269
УСОВ А.В., СИКИРАШ Ю.Е. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ	280
ЧОПОРОВА О.В., ЛИСНЯК А.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КВАДРАТНОЙ ПЛАСТИНКИ	290
ЯРЕЦКАЯ Н.А., РАМСКИЙ А.А. ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ КОЛЬЦЕВОГО ШТАМПА И ПОЛУПРОСТРАНСТВА	300

CONTENTS

BLAZHEVSKIY S.G., LENYUK O.M., NIKITINA O.M., SHYNKARYK M.I. MODELING OF DYNAMIC PROCESSES BY THE METHOD OF HYBRID INTEGRAL TRANSFORM OF BESSEL-EULER-BESSEL TYPE ON THE POLAR AXIS	18
BRAILOV A.Yu., PANCHENKO V.I. THE COMBINED GEOMETRICAL MODEL IN THE OPTIMIZING APPROACH TO DETERMINATION THE PARAMETERS OF AN INACCESSIBLE POINT OF AN OBJECT	27
VALKO N.V., BOLGARIN T.O., VALKO K.V. ALGORITHM FOR DETERMINING THE PATH FOR AUTONOMOUS MOVEMENT OF UNMANNED VEHICLES ALONG THE LINE	39
VAKHNENKO V.O., VENGROVICH D.B., MICHCHENKO O.V. THE DIAGNOSTICS OF A STRUCTURED MEDIUM BY LONG NONLINEAR WAVES: THEORETICAL JACTIFICATION	49
VORONENKO S.V., SUBBOTIN O.V., LEBEDENKO Yu.O., RUDAKOVA H.V. ANALYSIS OF THE CONTROL SYSTEM EFFICIENCY OF THE SHIP INTEGRATED ELECTRICITY INSTALLING TURBO WITH THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS	60
HALCHENKO A.V., CHOPOROV S.V. THE DATA ENCODING IN DENIABLE ENCRYPTION ALGORITHMS	72
MYRHOROD V., HVOZDEVA I., LESHCHENKO V., TUMOLSKIY A., KALUEV A. PROBLEMS OF AERODYNAMIC STABILITY AND A MATHEMATICAL MODEL OF A WIND POWER PLANT OF TURBOGENERATOR TYPE	80
HRYTSYK V.V. RESEARCH OF IMAGE SEGMENTATION METHODS FOR THEIR UNIFICATION	88
YEVGRASHKINA G.P., KHARYTONOV M.M. AN ENVIRONMENT ASSESSMENT, MODELLING AND FORECAST OF THE SALTED REGIMES OF IRRIGATED ARABLE LANDS IN ARID REGIONS	99
KAGADIY T.S., SHPORTA A.H., BILOVA O.V., SCHERBINA I.V. STRESSED-STRAINED STATE OF A LAYERED BASIS WITH A FASTENING ELEMENT	107
KASHTAN V.J., HNATUSHENKO V.V. AN INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF PAN-SHARPENING METHODS OF HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES	117
KLOCHAN A.Ye. MATHEMATICAL MODEL OF THE AIRCRAFT'S POLARIMETRIC LANDING SYSTEM	128
KOVYLIN Y.R., VOLKOVSKY O.S. COMPUTER MODEL OF RESPONSE GENERATION IN THE SEARCH SYSTEM BASED ON AN UNSTRUCTURED KNOWLEDGE BASE	142
KORCHYNSKIY V.M., SVYNARENKO D.M. IMPROVED SPATIAL AND RADIOMETRIC RESOLUTION OF MULTISPECTRAL DIGITAL REMOTE SENSING IMAGES BASED ON THEIR ANALYTICAL SIGNALS	156
KUZ'MICH V.I., KUZMICH L.V., SAVCHENKO O.G. SIMULATION OF RECTILINEAR AND FLAT PLACEMENT OF POINTS OF METRIC SPACE	165
MIKHAILUTSA O.M., POZHUYEV A.V. THE USE OF COMPUTER TECHNOLOGY IN THE EDUCATIONAL SYSTEM OF TEACHING PAINTING	174
MYRHOROD V.F., HVOZDEVA I.M. ASSESSMENT OF POWER OF SOME NON-PARAMETRIC TREND CRITERIA	184
OSADCHY S.I., DJACHENKO M. M. ACQUISITION AND PRIMARY PROCESSING OF DATA FROM THE ARDUPILOT SYSTEM FOR IDENTIFICATION OF THE QUADROCOPTER DYNAMICS MODEL	197
OSADCHUK A.V., KRILIK L.V., OSADCHUK I.A. MATHEMATICAL MODEL OF A PARAMETRIC HUMIDITY TRANSDUCER WITH A FREQUENCY OUTPUT	206
PROLISKO E.E., SHUTS V.N., KOZINSKY A.A. MANAGING THE TRANSPORTATION PROCESS IN THE CITY PASSENGER TRANSPORT SYSTEM	216
REDCHYTS D.O., TARASOV S.V., TARASOV A.S., MOISEENKO S.V. NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY COLD PLASMA STREAMS OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN AIR	224
ROZHKOVA S., KHLOPENKO M., TIMOFEEV K., TERNOVA T., SOKOLOV A. INFORMATION TECHNOLOGIES IN THEORY RECOGNITION OF IMAGES. METHOD OF CONSTRUCTING MODELS AT SCENE ANALYSIS	235
SOKOLOVA N.O., BIELOV A.S. DEVELOPMENT OF IOT-SYSTEM SOFTWARE ON ARDUINO HARDWARE PLATFORM	251
STEGANTSEV E.V. THE CLASSIFICATION OF THE CONICS ACCORDING TO THEIR INVERSE IMAGES IN THE STEREOGRAPHIC PROJECTION	260

TROKHIMCHUCK P. P. MODELLING OF THE DIRECT LASER-INDUCED OPTICAL BREAKDOWN IN SOLID	269
USOV A.V., SIKIRASH Yu.Ye. MODELING OF THERMOPHYSICAL PROCESSES AT THE MECHANICAL PROCESSING OF PRODUCTS FROM STRUCTURALLY INHOMOGENEOUS MATERIALS	280
CHOPOROVA O. V., LISNIAK A. O. THE USE OF A GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE PARAMETERS OF THE NEURAL NETWORK IN PREDICTING THE STRESS-STRAIN STATE OF A SQUARED PLATE	290
YARETSKA N.O., RAMSKY A.O. INFLUENCE OF INITIAL STRESSES ON CONTACT INTERACTION OF PRE-STRESSED ANNULAR STAMP AND HALF SPACE	300

УДК 517.91:532.2

С.Г. БЛАЖЕВСЬКИЙ, О.М. ЛЕНЮК
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
О.М. НІКІТИНА
Чернівецький ліцей №1 математичного та економічного профілів
М.І. ШИНКАРИК
Тернопільський національний економічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕТОДОМ ГІБРИДНОГО ІНТЕГРАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ТИПУ БЕССЕЛЯ-ЕЙЛЕРА-БЕССЕЛЯ НА ПОЛЯРНІЙ ОСІ

На сучасному етапі науково-технічного прогресу, особливо у зв'язку з широким використанням композитних матеріалів, існує нагальна потреба у вивченні фізико-технічних характеристик таких матеріалів, що знаходяться в різних умовах експлуатації, що математично призводить до задачі розв'язування сепаратної системи диференціальних рівнянь другого порядку на кусково-однорідному інтервалі з відповідними початковими та крайовими умовами, зокрема, задача динаміки математично призводить до побудови розв'язку сепаратної системи диференціальних рівнянь з частинними похідними гіперболічного типу.

Одним із ефективних методів побудови інтегральних зображень аналітичних розв'язків алгоритмічного характеру задач математичної фізики є метод гібридних інтегральних перетворень.

У цій роботі побудовано розв'язок задачі динаміки на трискладовій полярній осі $r \geq R_0 > 0$ з двома точками спряження методом гібридного інтегрального перетворення Бесселя-Ейлера-Бесселя.

Задача динаміки на трискладовій полярній осі математично призводить до побудови обмеженого розв'язку сепаратної системи трьох диференціальних рівнянь з частинними похідними гіперболічного типу з відповідними початковими умовами, умовами спряження та крайовими умовами. Застосувавши до цієї крайової задачі гібридне інтегральне перетворення Бесселя-Ейлера-Бесселя, отримаємо задачу Коші. Знайшовши розв'язок задачі Коші, ми застосовуємо до нього обернене гібридне інтегральне перетворення Бесселя-Ейлера-Бесселя.

Пряме інтегральне перетворення Бесселя-Ейлера-Бесселя на полярній осі з двома точками спряження записується у вигляді матриці-рядка. Вихідна система та початкові умови записуються в матричній формі, і ми застосовуємо операторну матрицю-рядок до заданої задачі за правилом множення матриць. В результаті отримуємо задачу Коші для звичайного диференціального рівняння. Обернене перетворення Бесселя-Ейлера-Бесселя записується у вигляді операторної матриці-стовпця, і ми застосовуємо його до побудованого розв'язку задачі Коші. Після здійснення певних перетворень ми отримуємо єдиний розв'язок вихідної задачі.

Побудовані розв'язки крайових задач мають алгоритмічний характер, що дозволяє використовувати їх як у теоретичних дослідженнях, так і в числових розрахунках.

Ключові слова: гібридний диференціальний оператор; задача динаміки; гібридне інтегральне перетворення.

С.Г. БЛАЖЕВСКИЙ, О.М. ЛЕНЮК

Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

О.М. НИКИТИНА

Черновицкий лицей №1 математического и экономического профилей

Н.И. ШИНКАРИК

Тернопольский национальный экономический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДОМ ГИБРИДНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТИПА БЕССЕЛЯ-ЭЙЛЕРА-БЕССЕЛЯ НА ПОЛЯРНОЙ ОСИ

На современном этапе научно-технического прогресса, особенно в связи с широким использованием композитных материалов, существует настоятельная потребность в изучении физико-технических характеристик таких материалов, находящихся в различных условиях эксплуатации, что математически приводит к задаче решения сепаратной системы дифференциальных уравнений второго порядка на кусочно-однородном интервале с соответствующими начальными и краевыми условиями, в частности, задача динамики математически приводит к построению решения сепаратной системы дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа.

Одним из эффективных методов построения интегральных изображений аналитических решений алгоритмического характера задач математической физики является метод гибридных интегральных преобразований.

В этой работе построено решение задачи динамики на трехкомпонентной полярной оси $r \geq R_0 > 0$ с двумя точками сопряжения методом гибридного интегрального преобразования Бесселя-Эйлера-Бесселя.

Задача динамики на трехкомпонентной полярной оси математически приводит к построению ограниченного решения сепаратной системы трех дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа с соответствующими начальными условиями, условиями сопряжения и краевыми условиями. Применив к этой краевой задаче гибридное интегральное преобразование Бесселя-Эйлера-Бесселя, получим задачу Коши. Найдя решение задачи Коши, мы применяем к нему обратное гибридное интегральное преобразование Бесселя-Эйлера-Бесселя.

Прямое интегральное преобразование Бесселя-Эйлера-Бесселя на полярной оси с двумя точками сопряжения записывается в виде матрицы-строки. Исходная система и начальные условия записываются в матричной форме, и мы применяем операторную матрицу-строку к заданной задаче по правилу умножения матриц. В результате получаем задачу Коши для обыкновенного дифференциального уравнения. Обратное преобразование Бесселя-Эйлера-Бесселя записывается в виде операторной матрицы-столбца, и мы применяем его к построенному решению задачи Коши. После осуществления определенных преобразований мы получаем единственное решение исходной задачи.

Построенные решения краевых задач имеют алгоритмический характер, что позволяет использовать их как в теоретических исследованиях, так и в числовых расчетах.

Ключевые слова: гибридный дифференциальный оператор; задача динамики; гибридное интегральное преобразование.

S.G. BLAZHEVSKIY, O.M. LENYUK
Chernivtsi National University by Yuriy Fed'kovych

O.M. NIKITINA
Chernivtsi Lyceum №1 of Mathematical and Economic Profiles

M.I. SHYNKARYK
Ternopil National Economic University

MODELING OF DYNAMIC PROCESSES BY THE METHOD OF HYBRID INTEGRAL TRANSFORM OF BESSEL-EULER-BESSEL TYPE ON THE POLAR AXIS

At the present stage of scientific and technological progress, especially in connection with the widespread use of composite materials, there is an urgent need to study the physical and technical characteristics of such materials that are in different operating conditions, which mathematically leads to the problems of solving a separate system of differential equations of the second order on a piecewise homogeneous interval with the corresponding initial and boundary conditions, in particular, the dynamics problem mathematically leads to the construction of a solution of a separate system of partial differential equations of hyperbolic type.

One of the effective methods for constructing of integral representations of analytic solutions of the algorithmic nature of the problems of mathematical physics is the method of hybrid integral transforms.

In this paper we construct a solution of the dynamics problem on the three-component polar axis $r \geq R_0 > 0$ with two points of conjugation by the method of hybrid integral Bessel-Euler-Bessel transform. The problem of dynamics on the three-component polar axis mathematically leads to the construction of a limited solution of a separate system of three partial differential equations of hyperbolic type with corresponding initial conditions, conjugation conditions and boundary conditions. Applying to this boundary-value problem the hybrid integral Bessel-Euler-Bessel transform, we obtain the Cauchy problem. Finding a solution to the Cauchy problem, we apply to it the inverse hybrid integral Bessel-Euler-Bessel transform.

A straight integral Bessel-Euler-Bessel transform on the polar axis with two points of conjugation is written in the form of a matrix row. The output system and the initial conditions are written in a matrix form and we apply the operator matrix row to the given problem by the rule of multiplication of matrices. As a result we obtain the Cauchy problem for the ordinary differential equation. The inverse Bessel-Euler-Bessel transform is written in the form of an operator matrix column and we apply it to the constructed solution of the Cauchy problem. After completing certain transformations, we obtain the unique solution of the original problem.

The constructed solutions of boundary value problems have an algorithmic character, which allows us to use them both in theoretical studies and in numerical calculations.

Keywords: hybrid differential operator; problem of dynamic; hybrid integral transform.

Постановка проблеми

На сучасному етапі науково-технічного прогресу, особливо у зв'язку із широким застосуванням композитних матеріалів, виникає гостра потреба у вивченні фізико-технічних характеристик даних матеріалів, які знаходяться в різних умовах експлуатації, що математично приводить до задач інтегрування сепаратної системи диференціальних рівнянь другого порядку на кусково-однорідному інтервалі з

відповідними початковими та крайовими умовами [1–3], зокрема задача динаміки математично приводить до побудови розв'язку сепаратної системи рівнянь з частинними похідними гіперболічного типу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із ефективних методів побудови інтегральних зображень аналітичних розв'язків алгоритмічного характеру задач математичної фізики є метод гібридних інтегральних перетворень [1–6].

В [6] побудовано гібридне інтегральне перетворення (ГІП), породжене на полярній осі $r \geq R_0 > 0$ з двома точками спряження гібридним диференціальним оператором (ГДО) Бесселя-Ейлера-Бесселя.

Мета дослідження

Побудувати розв'язок задачі динаміки на трискладовій полярній осі $r \geq R_0 > 0$ з двома точками спряження за допомогою гібридного інтегрального перетворення типу Бесселя-Ейлера-Бесселя.

Викладення основного матеріалу дослідження

Задача динаміки на трискладовому сегменті математично приводить до побудови в області

$$D_2^+ = \{(t, r) : t > 0, r \in I_2^+\}, \quad I_2^+ = \{r : r \in (R_0, R_1) \cup (R_1, R_2) \cup (R_2, \infty); R_0 > 0\}$$

обмеженого розв'язку системи рівнянь гіперболічного типу

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + \gamma_1^2 u_1 - a_1^2 B_{\nu_1, \alpha_1} [u_1] &= f_1(t, r), \quad r \in (R_0, R_1), \\ \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} + \gamma_2^2 u_2 - a_2^2 B_{\alpha_3}^* [u_2] &= f_2(t, r), \quad r \in (R_1, R_2), \\ \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} + \gamma_3^2 u_3 - a_3^2 B_{\nu_2, \alpha_2} [u_3] &= f_3(t, r), \quad r \in (R_2, \infty), \end{aligned} \quad (1)$$

з початковими умовами

$$u_j(t, r)|_{t=0} = g_j(r), \quad \frac{\partial u_j}{\partial t}|_{t=0} = \varphi_j(r), \quad r \in (R_{j-1}, R_j), \quad j = \overline{1, 3}, \quad R_3 = \infty, \quad (2)$$

умовами спряження

$$\left[\left(\alpha_{j1}^k \frac{\partial}{\partial r} + \beta_{j1}^k \right) u_k - \left(\alpha_{j2}^k \frac{\partial}{\partial r} + \beta_{j2}^k \right) u_{k+1} \right] \Big|_{r=R_k} = 0, \quad j, k = 1, 2, \quad (3)$$

та крайовими умовами

$$\left(\alpha_{11}^0 \frac{\partial}{\partial r} + \beta_{11}^0 \right) u_1 \Big|_{r=R_0} = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial^k u_3}{\partial r^k} = 0, \quad k = 0, 1. \quad (4)$$

Тут беруть участь диференціальний оператор Бесселя $B_{\nu,\alpha}$ та диференціальний оператор Ейлера другого порядку B_{α}^* [6].

На коефіцієнти, що беруть участь в постановці задачі, накладаються певні природні умови обмеження [6].

В [6] побудовано пряме $H_{(\nu,\alpha)}$ й обернене $H_{(\nu,\alpha)}^{-1}$ гібридне інтегральне перетворення, породжене на множині I_2^+ гібридним диференціальним оператором

$$M_{(\nu,\alpha)} = \theta(r - R_0)\theta(R_1 - r)a_1^2 B_{\nu_1,\alpha_1} + \theta(r - R_1)\theta(R_2 - r)a_2^2 B_{\alpha_3}^* + \theta(r - R_2)a_3^2 B_{\nu_2,\alpha_2} :$$

$$H_{(\nu,\alpha)}[g(r)] = \int_{R_0}^{\infty} g(r)V_{(\nu,\alpha)}(r,\beta)\sigma(r)dr \equiv \tilde{g}(\beta), \quad (5)$$

$$H_{(\nu,\alpha)}^{-1}[\tilde{g}(\beta)] = \int_0^{\infty} \tilde{g}(\beta)V_{(\nu,\alpha)}^{-1}(r,\beta)\Omega_{(\nu,\alpha)}(\beta)d\beta \equiv g(r), \quad (6)$$

та виведена основна тотожність інтегрального перетворення гібридного диференціального оператора $M_{(\nu,\alpha)}$:

$$H_{(\nu,\alpha)}[M_{(\nu,\alpha)}[g(r)]] = -\beta^2 \tilde{g}(\beta) - \sum_{i=1}^3 k_i^2 \tilde{g}_i(\beta) + (-\alpha_{11}^0)^{-1} V_{(\nu,\alpha);1}(R_0,\beta) a_1^2 \sigma_1 R_0^{2\alpha_1+1} g_0 + \sum_{k=1}^2 d_k [Z_{(\nu,\alpha);12}^k(\beta)\omega_{2k} - Z_{(\nu,\alpha);22}^k(\beta)\omega_{1k}]. \quad (7)$$

Тут $\theta(x)$ – одинична функція Гевісайда, спектральна вектор-функція

$$V_{(\nu,\alpha)}(r,\beta) = \sum_{k=1}^3 \theta(r - R_{k-1})\theta(R_k - r)V_{(\nu,\alpha);k}(r,\beta), \quad R_3 = \infty,$$

вагова функція

$$\sigma(r) = \theta(r - R_0)\theta(R_1 - r)\sigma_1 r^{2\alpha_1+1} + \theta(r - R_1)\theta(R_2 - r)\sigma_2 r^{2\alpha_3-1} + \theta(r - R_2)\sigma_3 r^{2\alpha_2+1}$$

та спектральна щільність

$$\Omega_{(\nu,\alpha)}(\beta) = \beta b_3^{2\alpha_2} \left([\omega_{(\nu,\alpha);1}(r,\beta)]^2 + [\omega_{(\nu,\alpha);2}(r,\beta)]^2 \right)^{-1},$$

а також інші величини та функції, виписані в [6].

Знайдемо інтегральне зображення аналітичного розв'язку задачі (1) – (4) методом гібридного інтегрального перетворення типу Бесселя-Ейлера-Бесселя на трискладовій полярній осі $r \geq R_0 > 0$ з двома точками спряження, запровадженого правилами (5) – (7).

Запишемо систему (1) та початкові умови (2) у матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \gamma_1^2 - a_1^2 B_{v_1, \alpha_1}\right) u_1(t, r) \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \gamma_2^2 - a_2^2 B_{\alpha_3}^*\right) u_2(t, r) \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} + \gamma_3^2 - a_3^2 B_{v_2, \alpha_2}\right) u_3(t, r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t, r) \\ f_2(t, r) \\ f_3(t, r) \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} u_1(t, r) \\ u_2(t, r) \\ u_3(t, r) \end{bmatrix} \Big|_{t=0} = \begin{bmatrix} g_1(r) \\ g_2(r) \\ g_3(r) \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} u_1(t, r) \\ u_2(t, r) \\ u_3(t, r) \end{bmatrix} \Big|_{t=0} = \begin{bmatrix} \varphi_1(r) \\ \varphi_2(r) \\ \varphi_3(r) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Інтегральний оператор $H_{(v, \alpha)}$ згідно правила (5) зобразимо у вигляді операторної матриці-рядка:

$$H_{(v, \alpha)} [\dots] = \begin{bmatrix} \int_{R_0}^{R_1} \dots V_{(v, \alpha); 1}(r, \beta) \sigma_1 r^{2\alpha_1+1} dr & \int_{R_1}^{R_2} \dots V_{(v, \alpha); 2}(r, \beta) \sigma_2 r^{2\alpha_3-1} dr \\ \int_{R_2}^{\infty} \dots V_{(v, \alpha); 3}(r, \beta) \sigma_3 r^{2\alpha_2+1} dr \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Застосуємо операторну матрицю-рядок (9) за правилом множення матриць до задачі (8). Внаслідок основної тотожності (7) отримуємо задачу Коші:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{d^2}{dt^2} + \beta^2\right) \tilde{u}(t, \beta) + (k_1^2 + \gamma_1^2) \int_{R_0}^{R_1} u_1(t, r) V_{(v, \alpha); 1}(r, \beta) \sigma_1 r^{2\alpha_1+1} dr + \\ & + (k_2^2 + \gamma_2^2) \int_{R_1}^{R_2} u_2(t, r) V_{(v, \alpha); 2}(r, \beta) \sigma_2 r^{2\alpha_3-1} dr + \\ & + (k_3^2 + \gamma_3^2) \int_{R_2}^{\infty} u_3(t, r) V_{(v, \alpha); 3}(r, \beta) \sigma_3 r^{2\alpha_2+1} dr = \tilde{f}(t, \beta), \\ & \tilde{u}(t, \beta) \Big|_{t=0} = \tilde{g}(\beta), \quad \frac{d\tilde{u}}{dt} \Big|_{t=0} = \tilde{\varphi}(\beta). \end{aligned}$$

Припустимо, що $\max\{\gamma_1^2; \gamma_2^2; \gamma_3^2\} = \gamma_1^2$. Покладемо всюди $k_1^2 = 0$, $k_2^2 = \gamma_1^2 - \gamma_2^2 \geq 0$, $k_3^2 = \gamma_1^2 - \gamma_3^2 \geq 0$. Одержуємо задачу Коші:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{d^2}{dt^2} + \beta^2 + \gamma_1^2\right) \tilde{u}(t, \beta) = \tilde{f}(t, \beta), \\ & \tilde{u} \Big|_{t=0} = \tilde{g}(\beta), \quad \frac{d\tilde{u}}{dt} \Big|_{t=0} = \tilde{\varphi}(\beta). \end{aligned} \quad (10)$$

Безпосередньо перевіряється, що розв'язком задачі Коші (10) є функція [8]

$$\tilde{u}(t, \beta) = \frac{\sin \sqrt{\beta^2 + \gamma_1^2} t}{\sqrt{\beta^2 + \gamma_1^2}} \tilde{\varphi}(\beta) + \frac{d}{dt} \frac{\sin \sqrt{\beta^2 + \gamma_1^2} t}{\sqrt{\beta^2 + \gamma_1^2}} \tilde{g}(\beta) + \int_0^t \frac{\sin \sqrt{\beta^2 + \gamma_1^2} (t - \tau)}{\sqrt{\beta^2 + \gamma_1^2}} \tilde{f}(\tau, \beta) d\tau. \quad (11)$$

Інтегральний оператор $H_{(v, \alpha)}^{-1}$ згідно правила (6), як обернений до (9), зобразимо у вигляді операторної матриці-стовпця:

$$H_{(v, \alpha)}^{-1} [\dots] = \begin{bmatrix} \int_0^\infty \dots V_{(v, \alpha); 1}(r, \beta) \Omega_{(v, \alpha)}(\beta) d\beta \\ 0 \\ \int_0^\infty \dots V_{(v, \alpha); 2}(r, \beta) \Omega_{(v, \alpha)}(\beta) d\beta \\ 0 \\ \int_0^\infty \dots V_{(v, \alpha); 3}(r, \beta) \Omega_{(v, \alpha)}(\beta) d\beta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Застосувавши операторну матрицю-стовпець (12) за правилом множення матриць до матриці-елемента

$$[\tilde{u}(t, \beta)],$$

де функція $\tilde{u}(t, \beta)$ визначена формулою (11), одержуємо єдиний розв'язок гіперболічної задачі (1) – (4):

$$\begin{aligned} u_j(t, r) = & \int_0^t \int_{R_0}^{R_1} H_{(v, \alpha); j1}(t - \tau, r, \rho) [f_1(\tau, \rho) + \varphi_1(\rho) \delta_+(\tau)] \sigma_1 r^{2\alpha_1 + 1} d\rho d\tau + \\ & \int_0^t \int_{R_1}^{R_2} H_{(v, \alpha); j2}(t - \tau, r, \rho) [f_2(\tau, \rho) + \varphi_2(\rho) \delta_+(\tau)] \sigma_2 r^{2\alpha_3 - 1} d\rho d\tau + \\ & + \int_0^t \int_{R_2}^\infty H_{(v, \alpha); j3}(t - \tau, r, \rho) [f_3(\tau, \rho) + \varphi_3(\rho) \delta_+(\tau)] \sigma_3 r^{2\alpha_2 + 1} d\rho d\tau + \\ & + \frac{\partial}{\partial t} \int_{R_0}^{R_1} H_{(v, \alpha); j1}(t, r, \rho) g_1(\rho) \sigma_1 r^{2\alpha_1 + 1} d\rho + \frac{\partial}{\partial t} \int_{R_1}^{R_2} H_{(v, \alpha); j2}(t, r, \rho) g_2(\rho) \sigma_2 r^{2\alpha_3 - 1} d\rho + \\ & + \frac{\partial}{\partial t} \int_{R_2}^\infty H_{(v, \alpha); j3}(t, r, \rho) g_3(\rho) \sigma_3 r^{2\alpha_2 + 1} d\rho. \end{aligned} \quad (13)$$

У рівностях (13) беруть участь породжені неоднорідністю системи функції впливу:

$$H_{(v,\alpha);jk}(t,r,\rho) = \int_0^{\infty} \frac{\sin \sqrt{\beta^2 + \gamma_1^2} t}{\sqrt{\beta^2 + \gamma_1^2}} V_{(v,\alpha);j}(r,\beta) V_{(v,\alpha);k}(\rho,\beta) \Omega_{(v,\alpha)}(\beta) d\beta, \quad j,k = 1,2,3. \quad (14)$$

При цьому $\delta_+(t)$ – дельта-функція Дірака, зосереджена в точці $t=0+$. Вона використовується в рівності (13) для скорочення запису і означає, що потрібно брати значення відповідної функції в точці 0.

Зауваження. При $\max\{\gamma_1^2; \gamma_2^2; \gamma_3^2\} = \gamma_m^2$, $k_j^2 = \gamma_m^2 - \gamma_j^2 \geq 0$, $j = 1,2,3$, $m = 2,3$, й у формулі (14) вираз $(\beta^2 + \gamma_1^2)$ міняється на вираз $(\beta^2 + \gamma_m^2)$.

Висновки

Побудований розв'язок (13) гіперболічної задачі (1)–(4) має алгоритмічний характер, що дозволяє використовувати його як в теоретичних дослідженнях, так і в числових розрахунках.

Список використаної літератури

1. Коляно Ю. М. Методи теплопроводности и термоупругости неоднородного тела. К.: Наукова думка, 1992. 280 с.
2. Ленюк М. П. Температурні поля в плоских кусково-однорідних ортотропних областях. К.: Ін-т математики НАН України, 1997. 188 с.
3. Конет І. М., Ленюк М. П. Температурні поля в кусково-однорідних циліндричних областях. Чернівці: Прут, 2004. 276 с.
4. Нікітіна О. М. Гібридні інтегральні перетворення типу (Ейлера-Бесселя). Львів: Ін-т прикладних проблем математики і механіки ім. Я.С. Підстригача, 2008. 86 с. (Препринт. НАН України, Ін-т прикладних проблем математики і механіки ім. Я.С. Підстригача; 01-08).
5. Ленюк М. П., Шинкарик М. І. Гібридні інтегральні перетворення (Фур'є, Бесселя, Лежандра). Частина 1. Тернопіль: Економ. Думка, 2004. 368 с.
6. Ленюк О. М. Запровадження гібридного інтегрального перетворення Бесселя-Ейлера-Бесселя на полярній осі $r \geq R_0 > 0$. *Крайові задачі для диференціальних рівнянь*. 2011. Вип. 20. С. 56–66.
7. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972. 735 с.
8. Степанов В. В. Курс дифференциальных уравнений. М.: Физматгиз, 1959. 468 с.

References

1. Kolyano, Yu. M. (1992). *Metodyi teploprovodnosti i termouprugosti neodnorodnogo tela*. K.: Naukova dumka.
2. Leniuk, M. P. (1997). *Temperaturni polia v ploskykh kuskovo-odnorodnykh ortotropnykh oblastiakh*. K.: In-t matematyky NAN Ukrainy.
3. Konet, I. M., & Leniuk, M. P. (2004). *Temperaturni polia v kuskovo-odnorodnykh tsylindrychnykh oblastiakh*. Chernivtsi: Prut.
4. Nikitina, O. M. (2008). *Hibrydni intehralni peretvorennia typu (Eilera-Besselia)*. Working paper 01-08, Lviv: In-t prykladnykh problem matematyky i mekhaniky im. Ya.S. Pidstryhacha.
5. Leniuk, M. P., & Shynkaryk, M. I. (2004). *Hibrydni intehralni peretvorennia (Furie, Besselia, Lezhandra)*. Chastyna 1. Ternopil: Ekonom. Dumka.

6. Leniuk, O. M. (2011). Zaprovdzhennia hibrydnoho intehralnoho peretvorennia Besselia-Eilera-Besselia na poliarnii osi. *Kraiovi zadachi dlia dyferentsialnykh rivnian.* **20**, 56–66.
7. Tihonov, A. N., & Samarskiy, A. A. (1972). *Uravneniya matematicheskoy fiziki.* M.: Nauka.
8. Stepanov, V. V. (1959). *Kurs differentsialnykh uravneniy.* M.: Fizmatgiz.

Блажевський Степан Георгійович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри диференціальних рівнянь Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, e-mail: blgs@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3396-7253.

Ленюк Олег Михайлович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри диференціальних рівнянь Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, e-mail: O.Lenjuk@chnu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9494-2864.

Нікітіна Ольга Михайлівна – к.ф.-м.н., доцент, вчитель математики Чернівецького ліцею №1 математичного та економічного профілів, e-mail o.nikitina.chv@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0702-0453.

Шинкарик Микола іванович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри економіко-математичних методів, перший проректор Тернопільського національного економічного університету e-mail: shynkaryk_m@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8191-8953.

УДК 514.18+721.02.23

А. Ю. БРАЙЛОВ, В. И. ПАНЧЕНКО

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

КОМБИНИРОВАННАЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ОПТИМИЗАЦИОННОМ ПОДХОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕДОСТУПНОЙ ТОЧКИ ОБЪЕКТА

В настоящем исследовании разработаны комбинированная геометрическая модель и оптимизационный подход к определению параметров недоступной точки объекта.

Выявлена проблема и поставлены первостепенные задачи.

Суть проблемы – объективное противоречие между необходимостью получения точного значения определяемого параметра и наличием погрешности при любом измерении.

Цель настоящей работы — разработать комплексно комбинированную трехмерную геометрическую и аналитическую модели определения минимальной области (окрестности) значений параметров недоступной точки объекта.

Задачи статьи:

1. Разработать комбинированную трехмерную геометрическую модель со скрещивающимися визирными лучами для бесконтактного определения координат недоступной точки объекта при заданном расположении геодезического оборудования.

2. Разработать оптимизационную аналитическую модель определения области (окрестности) значений параметров недоступной точки объекта в соответствии с предложенной трехмерной геометрической моделью со скрещивающимися визирными лучами.

В предлагаемом оптимизационном подходе разработана комбинированная трехмерная геометрическая модель со скрещивающимися визирными лучами для определения координат недоступных точек объекта.

Определяемая точка C располагается в области $[C_{DM}, C_{EM}]$ минимального расстояния ρ_{min} между скрещивающимися визирными лучами.

Оптимизационная задача определения координат недоступной точки объекта в пространстве сводится к задаче определения минимального расстояния между двумя скрещивающимися визирными лучами.

Задача имеет единственное решение, если визирные лучи не параллельны.

Поиск экстремума функции расстояния между двумя визирными лучами, и именно минимума, имеет реальную геометрическую интерпретацию.

Функция расстояния $\rho=f(t_{CD}, t_{CE})$ достигает своего экстремума ρ_{min} , когда её частные производные по каждой переменной равны нулю. Поэтому решается система дифференциальных уравнений.

Искомая точка $C(x_C, y_C, z_C)$ может, например, располагаться в середине минимального отрезка $[C_{DM}, C_{EM}]$.

Предложенный теоретический подход проверен на реальных экспериментальных данных при восстановлении Спасо-Преображенского собора в городе Одессе, Украина. Определялись координаты самой высокой точки колоны пилястра C и точки C' уровня земли относительно горизонтальной плоскости с нулевыми визирными лучами.

Ключевые слова: объект; точка; экстремум; визирный луч; координаты точки; геометрическая модель; аналитическая модель.

КОМБІНОВАНА ГЕОМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ В ОПТИМІЗАЦІЙНОМУ ПІДХОДІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НЕДОСТУПНОЇ ТОЧКИ ОБ'ЄКТА

У даному дослідженні розроблені комбінована геометрична модель та оптимізаційний підхід для визначення параметрів недоступної точки об'єкта. Виявлено проблему і поставлені першочергові задачі.

Суть проблеми: об'єктивне протиріччя між необхідністю отримання точного значення потрібного параметра і наявністю похибок при будь-якому вимірюванні.

Мета дослідження – розробити комплексно комбіновану тривимірну геометричну і аналітичну моделі визначення мінімальної області значень параметрів недоступної точки об'єкта.

Завдання статті:

1. Розробити комбіновану тривимірну геометричну модель з перехресними візирними променями для безконтактного визначення координат недоступної точки об'єкта при заданому розташуванні геодезичного обладнання.

2. Розробити оптимізаційну аналітичну модель визначення області значень параметрів недоступної точки об'єкта відповідно до запропонованої тривимірної геометричної моделі з перехресними візирними променями.

У запропонованому оптимізаційному підході розроблена комбінована тривимірна геометрична модель з перехресними візирними променями для визначення координат недоступних точок об'єкта.

Обумовлена точка C розташовується в області $[C_{DM}, C_{EM}]$ мінімальної відстані ρ_{min} між перехресними візирними променями.

Оптимізаційна задача визначення координат недоступної точки об'єкта в просторі зводиться до задачі визначення мінімальної відстані між двома перехресними візирними променями.

Завдання має єдине рішення, якщо візирні промені не паралельні.

Пошук екстремуму функції відстані між двома візирними променями, і саме мінімуму, має реальну геометричну інтерпретацію.

Функція відстані $\rho=f(t_{CD}, t_{CE})$ досягає свого екстремуму ρ_{min} , коли її часткові похідні по кожній змінній дорівнюють нулю. Тому вирішується система диференціальних рівнянь.

Шукана точка $C(x_C, y_C, z_C)$ може, наприклад, розташовуватися в середині мінімального відрізка $[C_{DM}, C_{EM}]$.

Запропонований теоретичний підхід перевірений на реальних даних при відновленні Спасо-Преображенського собору в місті Одесі, Україна.

Визначалися координати найвищої точки колони пілястра C і точки C' рівня землі відносно горизонтальної площини з нульовими візирними променями.

Ключові слова: об'єкт; точка; екстремум; візирний промінь; координати точки; геометрична модель; аналітична модель.

A. Yu. BRAILOV, V. I. PANCHENKO
Odessa State Academy of Civil Building and Architecture

THE COMBINED GEOMETRICAL MODEL IN THE OPTIMIZING APPROACH TO DETERMINATION THE PARAMETERS OF AN INACCESSIBLE POINT OF AN OBJECT

In the present research the combined geometrical model and the optimizing approach to the determination of the parameters of an inaccessible point of an object is developed. The common issues are revealed and essential steps of their resolution are identified.

The essence of the problem is that the unavoidable contradiction between a need of obtaining the exact value of the determined parameter and an error involved in any measurement.

The purpose of the present work is to develop in a complex the combined three-dimensional geometrical and analytical models of the determination of the minimum domain (area, vicinity) of values of the parameters of an inaccessible point of an object.

It is achieved in two steps:

1. Development of a combined three-dimensional geometrical model with crossed directional rays for contactless determination of the coordinates of an inaccessible point of an object under a given arrangement of the geodetic equipment.

2. Development of an optimizing analytical model for the determination of domain (area, vicinity) of values of parameters of an inaccessible point of an object according to the developed three-dimensional geometrical model with crossed directional rays.

In the proposed optimizing approach, the combined three-dimensional geometrical model with crossed directional rays for the determination of coordinates of the inaccessible points of an object is developed. It is discussed that point C , coordinated of which to be determined, locates in domain $[C_{DM}, C_{EM}]$ of the minimum distance ρ_{min} between crossed directional rays.

The optimizing problem of the determination of coordinates of an inaccessible point of an object in space is reduced to a problem of the determination of the minimum distance between two crossed directional rays.

It is shown that the problem has a unique solution if the directional rays are not parallel. It is discussed that mathematical finding of an extremum of function of the distance between two directional rays, and the discussed minimum, has real geometrical interpretation.

It's known from the theory of function of multiple variables that function $f(t_{CD}, t_{CE})$ reaches its extremum ρ_{min} when its partial derivatives by each variable are equal to zero. Therefore, the system of the differential equations solved.

The required point $C(x_C, y_C, z_C)$ can be located, for example, in the middle of the minimum segment $[C_{DM}, C_{EM}]$.

The proposed theoretical approach is verified using real experimental data at restoration of the Spaso-Preobrazhenskiy cathedral in the city of Odessa, Ukraine.

Coordinates of the highest point of the colon of a pilaster C and points C' level of the earth concerning a horizontal plane with zero directional rays were determined.

Keywords; an object; point; extremum; directional ray; collimating ray; coordinates of a point; geometrical model; analytical model.

Постановка проблеми

Формирование паспорта реконструируемых или восстанавливаемых исторических объектов предполагает определение их геометрических параметров. Такими параметрами являются высота объекта и размеры охранной зоны.

Основная проблема заключается в объективном противоречии между необходимостью получения точного значения определяемого параметра и наличием погрешности при любом измерении.

Анализ последних исследований и публикаций

В предыдущих исследованиях реализована попытка получить аналитически точный результат для геометрической модели измерений с пересекающимися в требуемой точке визирными лучами [1–3].

Для предложенной геометрической модели измерений (рис. 1) разработан алгоритм расчета параметров недоступной точки объекта [4].

Разработанная алгоритмически корректная аналитическая модель [3–4], при обработке результатов экспериментальных измерений, показала необходимость перехода к комбинированной геометрической модели со скрещивающимися визирными лучами и созданию аналитической модели для определения минимальной области, в которой находится исследуемая точка объекта.

Цель исследования

Цель настоящего исследования – разработать комплексно комбинированную трехмерную геометрическую и аналитическую модели определения минимальной области (окрестности) значений параметров недоступной точки объекта.

Задачи статьи: 1. Разработать комбинированную трехмерную геометрическую модель со скрещивающимися визирными лучами для бесконтактного определения координат недоступной точки объекта при заданном расположении геодезического оборудования. 2. Разработать оптимизационную аналитическую модель определения области (окрестности) значений параметров недоступной точки объекта в соответствии с предложенной комбинированной трехмерной геометрической моделью со скрещивающимися визирными лучами.

Изложение основного материала исследования

В предлагаемом оптимизационном подходе разработана комбинированная трехмерная геометрическая модель определения координат недоступной точки объекта (рис. 2).

Комбинированная трехмерная геометрическая модель представляет собой объединение верхней геометрической модели, расположенной выше горизонтальной плоскости с нулевыми визирными лучами (рис. 1), и геометрической модели, являющейся симметричным отображением верхней модели относительно горизонтальной плоскости (рис. 2).

Разработанная комбинированная геометрическая модель отображает наиболее общий вариант расположения объекта относительно прибора.

Координаты x_{CD}, y_{CD}, z_{CD} , любой точки $C_D(x_{CD}, y_{CD}, z_{CD})$ визирного луча AD можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} x_{CD} = r_{Dx} \cdot t_{CD} + x_D \\ y_{CD} = r_{Dy} \cdot t_{CD} + y_D \\ z_{CD} = r_{Dz} \cdot t_{CD} + z_D \end{cases} \quad (1)$$

где t_{CE} – значение параметра t_E , определяющего положение любой точки C_E на луче BE .

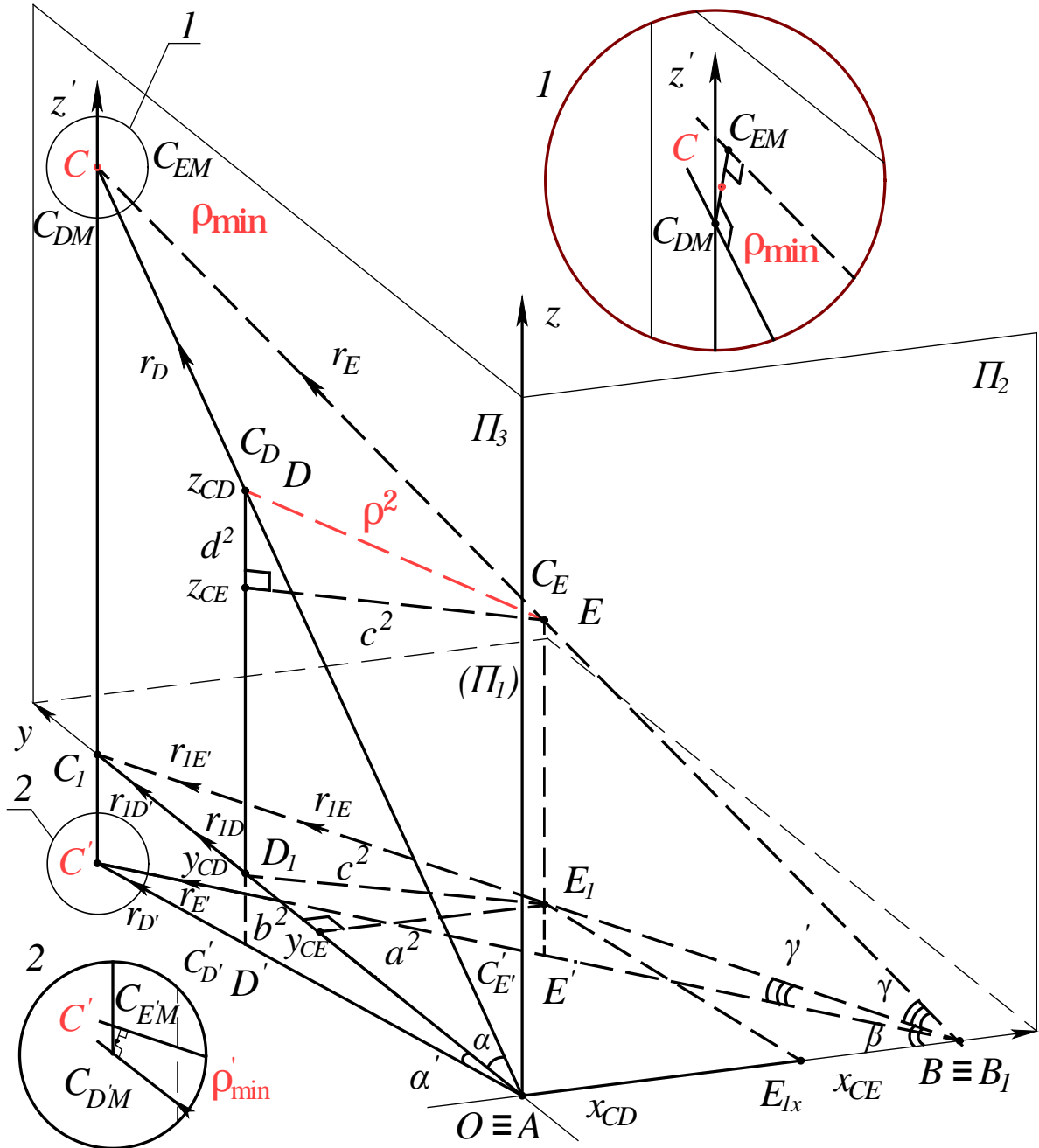


Рис. 2. Комбинированная геометрическая модель для определения расстояния между двумя точками C и C' .

Квадрат величины расстояния $[\rho(C_D, C_E)]^2$ между любыми двумя точками $C_D(x_{CD}, y_{CD}, z_{CD})$, $C_E(x_{CE}, y_{CE}, z_{CE})$ различных визирных лучей AD , BE в декартовом трехмерном пространстве представляется суммой квадратов разностей соответствующих координат этих точек:

$$f = [\rho(C_D, C_E)]^2 = (x_{CD} - x_{CE})^2 + (y_{CD} - y_{CE})^2 + (z_{CD} - z_{CE})^2 \quad (3)$$

Запишем расстояние между двумя любыми точками C_D и C_E двух различных визирных лучей в параметрической форме, подставляя в выражение (3) значения координат этих точек из систем уравнений (1) и (2):

$$\begin{aligned} \bar{f} = [\rho(C_D, C_E)]^2 &= (x_{CD} - x_{CE})^2 + (y_{CD} - y_{CE})^2 + (z_{CD} - z_{CE})^2 = \\ &= (r_{Dx} \cdot t_{CD} + x_D - r_{Ex} \cdot t_{CE} - x_E)^2 + (r_{Dy} \cdot t_{CD} + y_D - r_{Ey} \cdot t_{CE} - y_E)^2 + \\ &+ (r_{Dz} \cdot t_{CD} + z_D - r_{Ez} \cdot t_{CE} - z_E)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку реальные измерения углов α , β , γ и расстояния AB (рис. 1) осуществляются с погрешностями и значения этих параметров дробные числа, визирные лучи AD и BE , как правило, скрещиваются, а не пересекаются в определяемой точке C . Скрещивающиеся визирные лучи AD и BE имеют соответственно две точки C_{DM} и C_{EM} , между которыми расстояние ρ минимально ρ_{min} (рис. 1, 2).

Наиболее вероятно, что определяемая точка C располагается в области $[C_{DM}, C_{EM}]$ минимального расстояния ρ_{min} между скрещивающимися визирными лучами. Таким образом, задача определения координат недоступной точки объекта в пространстве, на первом этапе, сводится к задаче определения минимального расстояния между двумя скрещивающимися визирными лучами:

$$\bar{f} = [\rho(C_D, C_E)]^2 = f(t_{CD}, t_{CE}) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) видно, что расстояние $\rho(C_D, C_E)$ между двумя любыми точками C_D и C_E двух различных визирных лучей AD и BE есть функция от двух переменных $f(t_{CD}, t_{CE})$. Такими переменными являются параметры t_{CD} и t_{CE} двух лучей AD и BE соответственно. Следовательно, задача сводится к определению таких значений параметров t_{CD} и t_{CE} , при которых расстояние ρ (4) между двумя визирными лучами минимально ρ_{min} . Причем, задача имеет единственное решение, если визирные лучи не параллельны. Поиск экстремума функции расстояния (4) между двумя визирными лучами, и именно минимума, имеет реальную геометрическую интерпретацию.

Из теории функции нескольких переменных известно, что функция $f(t_{CD}, t_{CE})$ достигает своего экстремума, когда её частные производные по каждой переменной равны нулю [5]. Следовательно, для определения значений параметров t_{CD} и t_{CE} , при которых расстояние между скрещивающимися визирными лучами минимально, необходимо решить систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{df(t_{CD}, t_{CE})}{dt_{CD}} = 0 \\ \frac{df(t_{CD}, t_{CE})}{dt_{CE}} = 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Дифференцируя функцию расстояния (4) по переменным t_{CD} и t_{CE} , систему уравнений (6) представим в виде (7):

$$\begin{cases} 2(r_{Dx} \cdot t_{CD} + x_D - r_{Ex} \cdot t_{CE} - x_E) \cdot r_{Dx} + \\ + 2(r_{Dy} \cdot t_{CD} + y_D - r_{Ey} \cdot t_{CE} - y_E) \cdot r_{Dy} + \\ + 2(r_{Dz} \cdot t_{CD} + z_D - r_{Ez} \cdot t_{CE} - z_E) \cdot r_{Dz} = 0 \\ 2(r_{Dx} \cdot t_{CD} + x_D - r_{Ex} \cdot t_{CE} - x_E) \cdot (-r_{Ex}) + \\ + 2(r_{Dy} \cdot t_{CD} + y_D - r_{Ey} \cdot t_{CE} - y_E) \cdot (-r_{Ey}) + \\ + 2(r_{Dz} \cdot t_{CD} + z_D - r_{Ez} \cdot t_{CE} - z_E) \cdot (-r_{Ez}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Разделив каждое из уравнений системы (7) на два и сгруппировав члены с переменными t_{CD} и t_{CE} , получим систему из двух линейных уравнений (8):

$$\begin{cases} (r_{Dx}^2 + r_{Dy}^2 + r_{Dz}^2) \cdot t_{DC} - (r_{Ex} \cdot r_{Dx} + r_{Ey} \cdot r_{Dy} + r_{Ez} \cdot r_{Dz}) \cdot t_{CE} = \\ = -[(x_D - x_E) \cdot r_{Dx} + (y_D - y_E) \cdot r_{Dy} + (z_D - z_E) \cdot r_{Dz}] \\ - (r_{Dx} \cdot r_{Ex} + r_{Dy} \cdot r_{Ey} + r_{Dz} \cdot r_{Ez}) \cdot t_{CD} + (r_{Ex}^2 + r_{Ey}^2 + r_{Ez}^2) \cdot t_{CE} = \\ = (x_D - x_E) \cdot r_{Ex} + (y_D - y_E) \cdot r_{Ey} + (z_D - z_E) \cdot r_{Ez} \end{cases} \quad (8)$$

Запишем систему линейных уравнений (8) в классическом виде (9) для применения формул Крамера [6]:

$$\begin{cases} a_{11} \cdot t_{CD} + a_{12} \cdot t_{CE} = C_1 \\ a_{21} \cdot t_{CD} + a_{22} \cdot t_{CE} = C_2 \end{cases}, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= (r_{Dx}^2 + r_{Dy}^2 + r_{Dz}^2), \quad a_{22} = (r_{Ex}^2 + r_{Ey}^2 + r_{Ez}^2), \\ a_{12} &= a_{21} = -(r_{Ex} \cdot r_{Dx} + r_{Ey} \cdot r_{Dy} + r_{Ez} \cdot r_{Dz}), \\ C_1 &= -[(x_D - x_E) \cdot r_{Dx} + (y_D - y_E) \cdot r_{Dy} + (z_D - z_E) \cdot r_{Dz}], \\ C_2 &= [(x_D - x_E) \cdot r_{Ex} + (y_D - y_E) \cdot r_{Ey} + (z_D - z_E) \cdot r_{Ez}]. \end{aligned}$$

Формулы Крамера для решения системы линейных уравнений (8), представленных в виде системы (9), имеют вид (10):

$$t_{CD} = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad t_{CE} = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}, \\ \Delta_1 &= \begin{vmatrix} C_1 & a_{12} \\ C_2 & a_{22} \end{vmatrix} = C_1 \cdot a_{22} - a_{12} \cdot C_2, \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} a_{11} & C_1 \\ a_{21} & C_2 \end{vmatrix} = C_2 \cdot a_{11} - a_{21} \cdot C_1. \end{aligned}$$

Значения параметров t_{CD} и t_{CE} , полученные по формулам (10), являются значениями параметров t_{DM} и t_{EM} , при которых расстояние между скрещивающимися лучами AD и BE (рис. 1) минимально:

$$t_{DM} = t_{CD} \text{ и } t_{EM} = t_{CE}. \quad (11)$$

Координаты x_{DM}, y_{DM}, z_{DM} (12), x_{EM}, y_{EM}, z_{EM} (13) точек $C_{DM}(x_{DM}, y_{DM}, z_{DM}), C_{EM}(x_{EM}, y_{EM}, z_{EM})$, для которых расстояние $\rho(C_{DM}, C_{EM})$ между двумя скрещивающимися лучами AD и BE минимально ρ_{min} , получают подстановкой значений выражений (11) в системы уравнений (1) и (2) соответственно:

$$\begin{cases} x_{DM} = r_{Dx} \cdot t_{DM} + x_D \\ y_{DM} = r_{Dy} \cdot t_{DM} + y_D \\ z_{DM} = r_{Dz} \cdot t_{DM} + z_D \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} x_{EM} = r_{Ex} \cdot t_{EM} + x_E \\ y_{EM} = r_{Ey} \cdot t_{EM} + y_E \\ z_{EM} = r_{Ez} \cdot t_{EM} + z_E \end{cases} \quad (13)$$

Точки $C_{DM}(x_{DM}, y_{DM}, z_{DM}), C_{EM}(x_{EM}, y_{EM}, z_{EM})$ являются граничными точками отрезка $[C_{DM}, C_{EM}]$ с минимальным расстоянием между скрещивающимися визирными лучами AD и BE (Рис. 1, 2).

Искомая точка $C(x_C, y_C, z_C)$ может, например, располагаться в середине минимального отрезка $[C_{DM}, C_{EM}]$. Тогда формулы для расчета координат x_C, y_C, z_C такой "единственной" точки имеют вид:

$$x_C = (x_{DM} + x_{EM}) / 2, \quad (14)$$

$$y_C = (y_{DM} + y_{EM}) / 2, \quad (15)$$

$$z_C = (z_{DM} + z_{EM}) / 2. \quad (16)$$

Для разработанной геометрической модели измерений (рис. 1) координату x_C точки C целесообразно принимать равной нулю ($x_C=0$), так как визирный луч AD принадлежит плоскости ADC . Все точки плоскости ADC с визирным лучом AD имеют координату абсцисс со значением ноль.

Предлагаемый теоретический подход экспериментально проверен при восстановлении Спасо-Преображенского собора в городе Одессе, Украина (рис. 3). Определялись координаты самой высокой точки колоны пилястра C и точки C' уровня земли относительно горизонтальной плоскости с нулевыми визирными лучами.

Пилястр выполнен в форме колоны ионического ордера [7].

На основании прямых измерений шести параметров и данных разработанной комбинированной геометрической модели определяются значения координат шести исходных точек. Координаты этих шести точек являются исходными данными для решения поставленной задачи: определения расстояния от верхней точки колоны пилястра C до уровня земли C' .

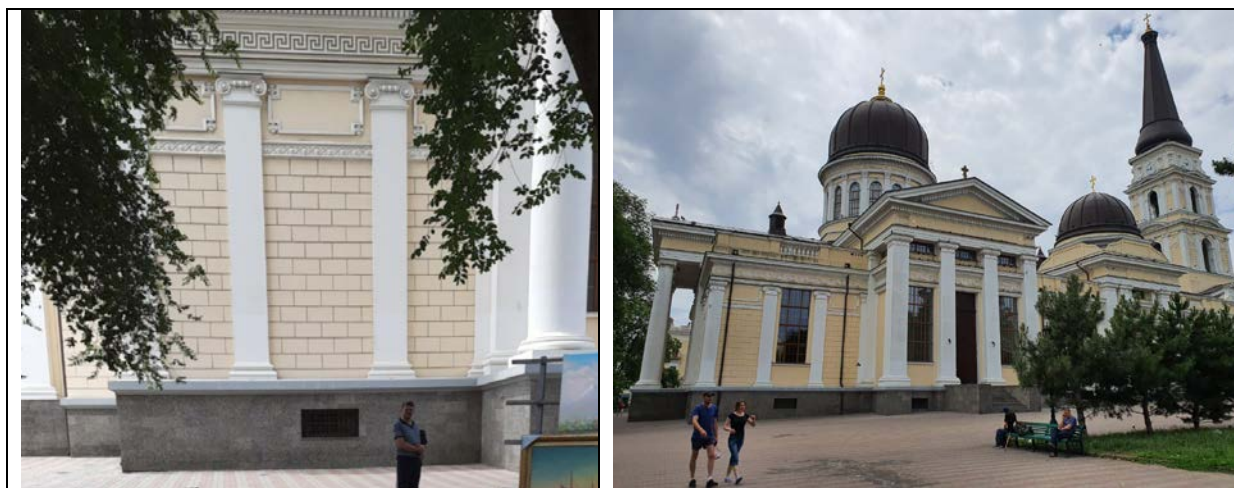


Рис. 3. Спасо-Преображенского собор в городе Одессе, Украина.

В соответствии с предложенной геометрической моделью (Рис. 2) для определения параметров точки C экспериментально тахеометром ES series №13813 JIS C6802:2005 измерены углы $\alpha=21,23^\circ$, $\beta=44,65^\circ$, $\gamma=15,18^\circ$ и расстояние между точками A и B — $AB=23916$ мм. Расстояние между точками A и D_I принималось равным 10000 мм и между точками B и E_I 15000 мм — $y_D=AD_I=10000$ мм, $BE_I=15000$ мм.

В соответствии с разработанной трехмерной геометрической моделью измерений (Рис. 1) все три координаты точки A равны нулю — $x_A=0$, $y_A=0$, $z_A=0$.

Координаты y_B и z_B точки B и координата x_D точки D также равны нулю — $y_B=0$, $z_B=0$, $x_D=0$.

Координата z_D точки D и координаты y_E , z_E и x_E точки E рассчитываются по формулам:
 $z_D=|AD_I| \cdot \operatorname{tg}\alpha=3885,44$ мм; $y_E=|BE_I| \cdot \sin\beta=10541,61$ мм;
 $z_E=|BE_I| \cdot \operatorname{tg}\gamma=4070,73$ мм; $x_E=|AB|-|BE_I| \cdot \cos\beta=13244,8$ мм.

На основании полученных координат всех четырех исходных точек $A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$, $D(x_D, y_D, z_D)$, $E(x_E, y_E, z_E)$ решается задача определения минимального расстояния между скрещивающимися визирными лучами AD и BE (рис. 1).

Рассчитываются координаты x_{DM}, y_{DM}, z_{DM} , x_{EM}, y_{EM}, z_{EM} точек $C_{DM}(x_{DM}, y_{DM}, z_{DM})$, $C_{EM}(x_{EM}, y_{EM}, z_{EM})$ для которых расстояние $\rho(C_{DM}, C_{EM})$ между двумя скрещивающимися лучами AD и BE минимально ρ_{min} — $x_{DM}=0$ мм; $y_{DM}=23606,44$ мм; $z_{DM}=9172,14$ мм; $x_{EM}=0,12$ мм; $y_{EM}=23625,47$ мм; $z_{EM}=9123,16$ мм.

Пусть искомая точка $C(x_C, y_C, z_C)$ располагается в середине минимального отрезка $[C_{DM}, C_{EM}]$ и её отклонение от профильной плоскости находится в пределах одного процента срединного отклонения по оси абсцисс Ox . Тогда её координаты легко рассчитываются — $x_C=0,0005$ мм, $y_C=23615,95$ мм, $z_C=9147,65$ мм.

Абсолютная погрешность расчетов по каждой из координат составляет $\Delta x=0,0005$ мм, $\Delta y=19,03$ мм, $\Delta z=48,98$ мм. Относительная погрешность решения экстремальной задачи равна $\Sigma x=0,9\%$, $\Sigma y=0,08\%$, $\Sigma z=0,5\%$.

В соответствии с предложенной геометрической моделью (рис. 2) для определения параметров точки C' экспериментально тахеометром ES series №13813 JIS C6802:2005 измерены углы $\alpha'=2,75^\circ$, $\beta=44,65^\circ$, $\gamma'=1,95^\circ$.

Координата $x_{D'}$ точки D' равна нулю — $x_{D'}=0$. Координата $z_{D'}$ точки D' и координаты $y_{E'}$, $z_{E'}$ и $x_{E'}$ точки E' рассчитываются по формулам — $z_{D'}=|AD_I| \cdot \operatorname{tg}\alpha'=480,33$ мм; $y_{E'}=|BE_I| \cdot \sin\beta=10541,61$ мм; $z_{E'}=|BE_I| \cdot \operatorname{tg}\gamma'=510,71$ мм; $x_{E'}=|AB|-|BE_I| \cdot \cos\beta=13244,8$ мм.

На основании полученных координат всех четырех исходных точек $A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$, $D'(x_{D'}, y_{D'}, z_{D'})$, $E'(x_{E'}, y_{E'}, z_{E'})$ решается задача определения минимального расстояния между скрещивающимися визирными лучами AD' и BE' (Рис. 1).

Рассчитываются координаты $x_{D'M}, y_{D'M}, z_{D'M}$, $x_{E'M}, y_{E'M}, z_{E'M}$ точек $C_{D'M}(x_{D'M}, y_{D'M}, z_{D'M})$, $C_{E'M}(x_{E'M}, y_{E'M}, z_{E'M})$ для которых расстояние $\rho(C_{D'M}, C_{E'M})$ между двумя скрещивающимися лучами AD' и BE' минимально ρ_{min} — $x_{D'M}=0$ мм; $y_{D'M}=23626,05$ мм; $z_{D'M}=1134,84$ мм; $x_{E'M}=0,004$ мм; $y_{E'M}=23625,58$ мм; $z_{E'M}=1144,58$ мм.

Пусть искомая точка $C'(x_{C'}, y_{C'}, z_{C'})$ располагается в середине минимального отрезка $[C_{D'M}, C_{E'M}]$ и её отклонение от профильной плоскости находится в пределах одного процента срединного отклонения по оси абсцисс Ox . Тогда её координаты легко рассчитываются — $x_{C'}=0,00002$ мм, $y_{C'}=23625,81$ мм, $z_{C'}=1139,71$ мм.

Абсолютная погрешность расчетов по каждой из координат составляет $\Delta x=0,00002$ мм, $\Delta y=0,47$ мм, $\Delta z=9,74$ мм. Относительная погрешность решения экстремальной задачи равна $\Sigma x=0,9$ %, $\Sigma y=0,002$ %, $\Sigma z=0,85$ %.

Расстояние верхней точки колоны пилоэстра C от уровня земли C' равно 10287 мм.

Выводы

1. Таким образом, только шесть параметров разработанной комбинированной геометрической модели определяются прямыми измерениями.
2. Значения двенадцати исходных параметров непосредственно позволяет задать предложенная геометрическая модель. И шесть параметров рассчитываются на основании измеренных параметров и простейших геометрических соотношений.
3. Предложенный оптимизационный подход имеет реальную геометрическую интерпретацию.
4. Абсолютная погрешность расчетов координат недоступной точки реконструируемого объекта приемлема в строительстве.
5. Низкая относительная погрешность (1%) расчетов координат недоступной точки доказывает высокую эффективность предложенного оптимизационного подхода.

Список использованной литературы

1. Браилов А. Ю. Инженерная геометрия. Киев: Каравелла, 2016. 472 с.
2. Браилов А. Ю., Панченко В. И., Косенко С. И. Анализ геометрической модели определения параметров недоступной точки объекта. *Сучасні проблеми моделювання*. 2019. Вип. 14. С. 38–47.
3. Браилов А. Ю., Панченко В. И. Аналитическое основание геометрической модели измерений параметров недоступной точки объекта. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2019. Вып.2[69]. Часть 3. С. 237–243.
4. Браилов А. Ю., Панченко В. И. Алгоритм расчета параметров недоступной точки объекта. *Сучасні проблеми моделювання*. 2019. Вип. 16. С. 39–49.
5. Корн Г. А. Корн Т. М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1978. 832 с.
6. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986. 544 с.
7. Герасимова Д. Л., Пороник И. Б. Справочник по архитектурным формам. Одесса: Астропринт, 2005. 140 с.

References

1. Brailov, A. Yu. (2016). Inzhenernaya geometriya. Kiev: Karavella.

2. Brailov, A. Yu., Panchenko, V. I., & Kosenko, S. I. (2019). Analiz geometricheskoy modeli opredeleniya parametrov nedostupnoy tochki ob'ekta. *Suchasni problemy modeliuvannia*. **14**, 38–47.
3. Brailov, A. Yu., & Panchenko, V. I. (2019). Analiticheskoe osnovanie geometricheskoy modeli izmereniy parametrov nedostupnoy tochki ob'ekta. *Vestnik Hersonskogo natsionalnogo tehnikeskogo universiteta*. **2**(69), Part 3, 237–243.
4. Brailov, A. Yu., & Panchenko, V. I. (2019). Algoritm rascheta parametrov nedostupnoy tochki ob'ekta. *Suchasni problemy modeliuvannia*. **16**, 39–49.
5. Korn, G. A., & Korn, T. M. (1978). *Spravochnik po matematike dlya nauchnyih rabotnikov i inzhenerov*. M.: Nauka.
6. Bronshteyn, I. N., & Semendyaev, K. A. (1986). *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchaschihsya vtuzov*. M.: Nauka.
7. Gerasimova, D. L., & Poronik, I. B. (2005). *Spravochnik po arhitekturnym formam*. Odessa: Astroprint.

Браилов Александр Юрьевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор; профессор кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Одесской государственной академия строительства и архитектуры, e-mail: brailov@gmail.com.

Панченко Виталий Иванович – магистр, ведущий инженер Отдела информационного обеспечения Одесской государственной академия строительства и архитектуры, e-mail: gb126t@gmail.com.

УДК 004.775:625.75

Н.В. ВАЛЬКО, Т.О. БОЛГАРІН
Херсонський державний університет
К.В. ВАЛЬКО

Київський національний університет ім. Т.Г.Шевченка

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХУ ДЛЯ АВТОНОМНОГО РУХУ БЕЗПІЛОТНОГО ТРАНСПОРТУ ПО ЛІНІЇ

Створення роботизованих систем та їх програмування представляють мультидисциплінарну сферу, що є підрозділами алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання. Все більш популярною стає тенденція, коли лідери автомобільної промисловості випускають автомобілі з технологією автономного керування. Такі транспортні засоби є більш безпечними, їх використання сприяє зменшенню кількості ДТП, та, відповідно, рівня травматизму. Також вони використовуються як одне з рішень в логістичних задачах «останньої милі» - складність, яка пов'язана з останнім етапом доставки. На сучасному етапі розвитку технологій актуальним є розвиток систем штучного інтелекту і автоматизація таких процесів. Задача автономного керування транспортом потребує використання спеціалізованих методів і загальних алгоритмів машинного навчання, зокрема комп'ютерного зору, що базується на обробці зображень. В статті представлено алгоритм визначення шляху автономного руху безпілотного транспорту по лінії. Розглянуті існуючі методи обробки зображень, алгоритми їх застосування та проблеми, які виникають при обробці зображень. Представлений алгоритм для пошуку шляху на зображенні з камери був апробований на комп'ютерній моделі автомобіля. Такий автомобіль був підготовлений для змагань моделей з автономним керуванням в рамках змагань Robotraffic. Стояло завдання підвищити ефективність функціонування наявних датчиків за допомогою додаткового обладнання у вигляді зовнішньої камери. Відеодані повинні були оброблятися програмно для визначення шляху для автономного руху транспорту. Був створений алгоритм, який працює за принципом дискретизації всього шляху на частини, кожна з яких обробляється окремо. Обробка частини представляє собою усереднення бінарної інформації про ширину шляху: ширина сегменту шляху повинна бути більше ніж наступний сегмент. Усі сегменти в остаточному представленні комбінуються у дерево шляхів з яких обирається один для подальшого руху. алгоритм можна легко модифікувати на віддавання пріоритету лівим або правим шляхам. Алгоритм забезпечує досить швидкий пошук шляху. Усі розрахунки ведуться в режимі реального часу. Перевагами є простота та швидкодія. Тому алгоритм можна використовувати для створення системи автономного керування моделями автомобілів. Представлений алгоритм можна використовувати для створення більш точної системи для керування автономними моделями автомобілів, а також для створення власних систем допомоги керування реальним транспортом з використанням камери та міні комп'ютерів. Також одним із наступних завдань є розробка системи для виявлення дорожніх знаків на зображенні.

Ключові слова: автономний рух; моделювання; алгоритм; безпілотний транспорт; розпізнавання.

Н.В. ВАЛЬКО, Т.А. БОЛГАРИН
Херсонский государственный университет
К.В. ВАЛЬКО

Киевский национальный университет им.Т.Г.Шевченко

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПУТИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТА ПО ЛИНИИ

Создание роботизированных систем и их программирование представляют мультидисциплинарную сферу, являются подразделениями алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения. Все более популярной становится тенденция, когда лидеры автомобильной промышленности выпускают автомобили с технологией автономного управления. Такие транспортные средства являются более безопасными, их использование способствует уменьшению количества ДТП и, соответственно, уровня травматизма. На современном этапе развития технологий актуальным является развитие систем искусственного интеллекта и автоматизация таких процессов. Задача автономного управления транспортом требует использования специализированных методов и общих алгоритмов машинного обучения, в частности компьютерного зрения, основанной на обработке изображений. В статье представлены алгоритм определения пути автономного движения беспилотного транспорта по линии. Представленный алгоритм для поиска пути на картинке с камеры был апробирован на компьютерной модели автомобиля. Рассмотрены существующие методы обработки изображений, алгоритмы их применения и проблемы, возникающие при обработке изображений. Представленный алгоритм для поиска пути по картинке с камеры был апробирован на компьютерной модели автомобиля. Такой автомобиль был подготовлен для соревнований моделей с автономным управлением в соревнованиях Robotraffic. Стояла задача повысить эффективность функционирования имеющихся датчиков с помощью дополнительного оборудования в виде внешней камеры. Видеоданные должны были обрабатываться программно для определения пути для автономного движения транспорта. Был создан алгоритм, который работает по принципу дискретизации всего пути на части, каждая из которых обрабатывается отдельно. Обработка части представляет собой усреднение бинарной информации о ширине пути: ширина сегмента пути должна быть больше чем следующий сегмент. Все сегменты в конечном представлении комбинируются в дерево путей из которых избирается один для дальнейшего движения. алгоритм можно легко модифицировать для приоритета по левым или правым путям. Алгоритм обеспечивает достаточно быстрый поиск пути. Все расчеты ведутся в режиме реального времени. Преимуществами являются простота и быстрое действие. Алгоритм можно использовать для создания системы автономного управления моделями автомобилей. Представленный алгоритм можно использовать для создания более точной системы для управления автономными моделями автомобилей, а также для создания собственных систем помощи управления реальным транспортом с использованием камеры и мини компьютеров. Также одним из следующих задач является разработка системы для выявления дорожных знаков на изображении.

Ключевые слова: автономное движение; моделирование; алгоритм, беспилотный транспорт; распознавание.

N.V. VALKO, T.O. BOLGARIN

Kherson State University

K.V. VALKO

T. Shevchenko National University of Kyiv

ALGORITHM FOR DETERMINING THE PATH FOR AUTONOMOUS MOVEMENT OF UNMANNED VEHICLES ALONG THE LINE

Creating robotic systems and their programming represents a multidisciplinary field, they are subdivisions of artificial intelligence algorithms and machine learning. An increasingly popular trend is for the leaders of the automotive industry to produce vehicles with autonomous driving technology. Such vehicles are safer, their use helps to reduce the number of accidents and, accordingly, the level of injuries. The same stench is vicious as one of the solutions in the logistic tasks of 'the last mile' – folding, which is tied to the last stage of delivery. At the present stage of technology development, the development of artificial intelligence systems and the automation of such processes are relevant. The problem of autonomous vehicle control requires using specialized methods and general algorithms for machine learning, in particular, computer vision based on image processing. The article presents an algorithm for determining the path for autonomous movement of unmanned vehicles along the line. Existing methods of image processing, algorithms for their application and problems arising in image processing are considered. The presented algorithm for finding a path from a picture from a camera was tested on a computer model of a car. Such a car was prepared for the autonomous model competition in the Robotraffic competition. The task was to increase the efficiency of the existing sensors using additional equipment in the form of an external camera. The video data had to be processed programmatically to determine the path for autonomous traffic. An algorithm was created that works on the principle of sampling the entire path into parts, each of which is processed separately. Part processing is an averaging of binary information about the path width: the path segment width must be greater than the next segment. All segments in the final presentation are combined into a tree of paths from which one is selected for further movement. the algorithm can be easily modified for left or right path priority. The algorithm provides a fairly fast path finding. All calculations are carried out in real time. The advantages are simplicity and speed. The algorithm can be used to create an autonomous control system for car models. The presented algorithm for finding a path in a picture from a camera was tested on a computer model of a car. The presented algorithm can be used to create a more accurate system for controlling autonomous car models, as well as to create your own systems for helping to control real transport using a camera and mini computers. Also one of the next tasks is to develop a system for identifying road signs in the image.

Keywords: autonomous movement; modeling; algorithm; unmanned vehicles; recognition.

Постановка проблеми

Одним з найбільш затребуваних на сьогодні напрямів досліджень і розробок є робототехніка, яка орієнтована на створення роботів і робототехнічних систем, призначених для автоматизації складних технологічних процесів і операцій, у тому числі таких, що виконуються в недетермінованих умовах, для заміни людини під час виконання важких, утомливих і небезпечних робіт. Прикладом є роботизовані автомобілі, які будуть реагувати швидше, ніж люди, уникаючи нещасних випадків, потенційно зберігаючи тисячі життів.

З огляду на практичну потребу розвитку інноваційних напрямів технологій, популяризації науково-технічної творчості, робототехніки, електроніки, створення і

програмування роботизованих систем, які в довгостроковій перспективі будуть реалізовуватися в реальних системах, зокрема, з метою скорочення кількості автомобільних аварій, було обрано тему дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Щоб дістатися до пункту призначення, безпілотний автомобіль має знати маршрут, розуміти довкілля, дотримуватись ПДР та коректно взаємодіяти з іншими учасниками дорожнього руху. Щоб відповідати зазначеним вимогам, безпілотник використовує різні пристрої та технології: камери, радары, лазерні далекоміри, GPS навігатори та, звісно, штучний інтелект. За допомогою камер відбувається візуальне виявлення об'єктів, наприклад, дорожньої розмітки та знаків.

Комп'ютерний зір - це область дослідження, орієнтована на проблему допомоги комп'ютерам «бачити». Це мультидисциплінарна сфера, яку можна назвати підрозділом штучного інтелекту та машинного навчання, що може включати використання спеціалізованих методів і використання загальних алгоритмів навчання.

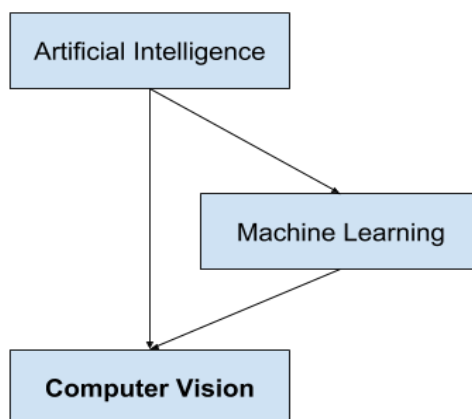


Рис. 1. Огляд відношення штучного інтелекту та комп'ютерного зору.

Комп'ютерний зір відрізняється від обробки зображень, оскільки обробка зображень – це процес створення нового зображення з існуючого зображення. Це тип цифрової обробки сигналів і не пов'язаний з розумінням змісту зображення.

Система комп'ютерного зору може вимагати, щоб обробка зображення застосовувалася до вхідних даних, наприклад, попередня обробка зображень.

Приклади обробки зображень включають:

- Нормалізацію фотометричних властивостей зображення, наприклад яскравості або кольору.
- Обрізку меж зображення, наприклад, центрування об'єкта на фотографії.
- Видалення цифрового шуму з зображення, наприклад цифрових артефактів з низьким рівнем освітлення.

Існуючі методи вирішення завдання обробки зображень комп'ютерного зору ефективні тільки для окремих об'єктів, таких як прості геометричні об'єкти (наприклад, багатогранники), людські обличчя, друковані або рукописні символи, автомобілі і тільки в певних умовах, зазвичай це певне освітлення, фон і положення об'єкта відносно камери. У [1] описані наступні проблем розпізнавання:

- Розпізнавання: один або кілька попередньо заданих або вивчених об'єктів або класів об'єктів можуть бути розпізнані, зазвичай разом з їх двовимірним положенням на зображенні або тривимірним положенням на сцені.

- Ідентифікація: розпізнається індивідуальний екземпляр об'єкта. Приклади: ідентифікація певного людського обличчя або відбитку пальців або автомобіля.
- Виявлення: відеодані перевіряються на наявність певної умови. Наприклад, виявлення можливих неправильних клітин або тканин в медичних зображеннях. Виявлення, засноване на відносно простих і швидких обчисленнях іноді використовується для знаходження невеликих ділянок у вже проаналізованому зображенні, які потім аналізуються за допомогою прийомів, більш вимогливих до ресурсів, для отримання правильної інтерпретації.

Мета дослідження

Мета дослідження – створення комп'ютерної моделі визначення шляху для автономного руху безпілотного транспорту по лінії за допомогою технології комп'ютерного зору.

Викладення основного матеріалу дослідження

Існує багато різних методів та їх варіацій для визначення шляху на фото або у відео потоку для автономних транспортних засобів. Найбільш розповсюдженим методом для розпізнавання розмітки є метод, який базується на детекторі границь Кенні та перетворення Хафа [2–3] для пошуку на зображенні прямих, які задовольняють умовам.

Перш за все, зображення роблять бінарним, тобто повнокольорове або зображення в градаціях сірого перетворюють в монохромне, де присутні тільки два типи пікселів (темні і світлі). Це має велике значення при розпізнаванні образів. Прикладом бінарних об'єктів є штрих-коди, текст, креслення, дорожня розмітка і т.п. Порогові методи бінаризації працюють з повним зображенням, знаходячи якусь характеристику (поріг), що дозволяє розділити всі зображення на чорне і біле. Адаптивні методи працюють з ділянками зображень і використовуються при неоднорідному освітленні об'єктів.

Після цього до зображення застосовується детектор границь Кенні. Це алгоритм оптимального визначення меж, який розраховує градієнти інтенсивності зображення, а потім за допомогою двох порогів видаляє слабкі кордони, залишаючи ті, які задовольняють умовам. Після визначення границь до зображення застосовується перетворення Хафа, за допомогою якого отримують набір ліній, які потім об'єднують у розмітку враховуючи деякі умови.

Метод зіставлення з шаблоном шукає точне співпадіння точок шаблону з точками зображення. Якщо зображення повернуто чи зі зміненим розміром щодо параметрів шаблону то цей метод працює погано. Для подолання цих обмежень застосовують методи засновані на так званих особливих точках.

Особлива точка (key point) - невелика область, яка істотно виділяється на зображенні. Існує кілька методів визначення таких точок, це можуть бути кути (Harris corner detector) [4] або BLOB (Blob detection) [5], тобто невеликі області однакової яскравості, досить чітким кордоном, що виділяються на загальному тлі.

Для особливої точки обчислюють так званий дескриптор - характеристику особливої точки. Дескриптор обчислюють за заданою околицею особливої точки, як напрямки градієнтів яскравості різних частин цієї околиці. Існує кілька методів розрахунку дескрипторів для особливих точок: SIFT[6], SURF[7], ORB[8] і ін. Треба зазначити, що деякі методи розрахунку дескрипторів є запатентованим (наприклад SIFT) і їх комерційне використання обмежене.

Особливі точки можна застосовувати для пошуку об'єкта на зображенні. Для цього нам необхідно мати зображення шуканого об'єкта і далі виконати наступні дії.

1. На зображенні з об'єктом шукаємо особливі точки об'єкта і обчислюємо їх дескриптори.

2. На уже згадуваному зображенні теж шукаємо особливі точки і обчислюємо для них дескриптори.

3. Порівнюємо дескриптори особливих точок об'єкта та дескриптори особливих точок, знайдених на зображенні.

4. Якщо знайдено достатню кількість відповідностей то помічаємо область з відповідними точками.

Для того, щоб успішно розв'язати задачу пошуку об'єктів на відео, її можна розділити на три підзадачі:

- виявлення (detection) - виділяємо області на зображенні, які можуть містити цікавий для нас об'єкти,

- розпізнавання (recognition) - уточнюємо типи знайдених об'єктів,

- супровід (tracking) - локалізація на наступних кадрах розпізнаних об'єктів.

Гістограма спрямованих градієнтів (Histogram of Oriented Gradients, HOG) [9] – метод вилучення ознак із зображень, який дуже схожий на метод обчислення дескрипторів SIFT для особливих точок, тільки обчислюємо його не для околиці особливої точки, але для всього зображення. Загальна схема обчислення HOG виглядає наступним чином. Картинка розділяється на частини (осередки), для кожного осередку будуємо гістограму напрямків градієнта яскравості, далі гістограми осередків нормуються по контрасту і об'єднуються.

Для формування характеристики зображення використовують кілька різних ознак Хаара, у кожного будуть свої параметри - розмір області для обчислення ознаки, кількість частин, позиція на зображенні.

На основі ознак Хаара побудований метод Віюли-Джонса [10], який часто використовують для локалізації зображення осіб на фотографіях. Він об'єднує в собі ознаки Хаара, класифікатор AdaBoost [11] і метод ковзного вікна для поділу картинки на частини.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для створення віртуального середовища з автомобілем було використано ігровий рушій Unity 3D. Цей рушій було обрано як найбільш простий та здатний симулювати елементарну механіку автомобіля. Також було створено об'єкт камери та прикріплено його до моделі автомобіля.

Для обробки зображення з камери було обрано мову програмування Python 3 та бібліотеки:

- numpy - дозволяє більш швидко працювати з багатовимірними масивами

- opencv - має широкий спектр інструментів для CV

Фінальна система працює таким чином (рис. 2.):

1. Камера з автомобіля отримує зображення.

2. Зображення передається у систему обробки, написану мовою Python.

3. Проводиться пошук шляху на зображенні.

4. Результати повертаються назад до системи керування автомобіля.

5. Виконується керування транспортним засобом на основі результатів аналізу зображення.

6. Повертаємось до п.1.

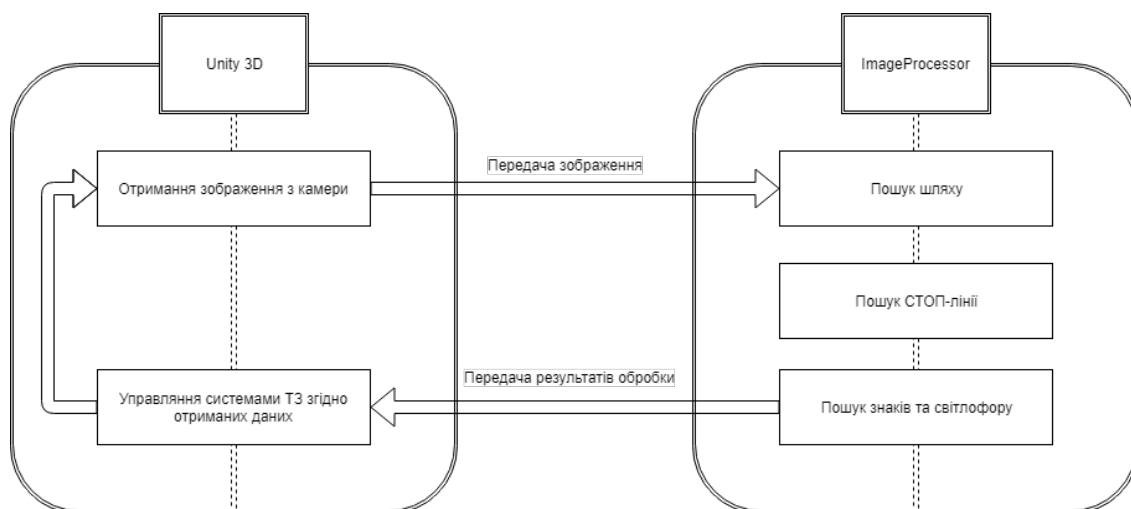


Рис. 2. Схема функціонування системи.

Для вирішення задачі пошуку шляху на фото було зроблено спробу створити власний алгоритм, перевагами якого будуть: швидкість, точність, «далекоглядність» (алгоритм може розраховувати шлях на кілька кроків вперед).

Як результат, було розроблено власний алгоритм для пошуку шляху на зображенні з камери.

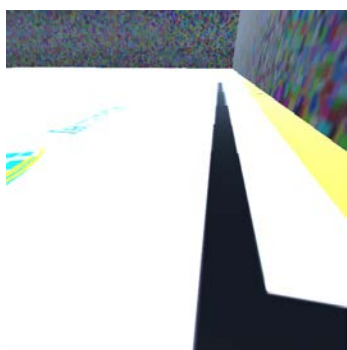


Рис. 3. Приклад зображення з камери.



Рис. 4. Відтінки сірого зображення.



Рис. 5. Стиснення та бінаризація зображення.

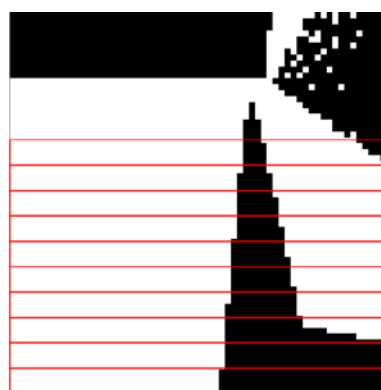


Рис. 6. Поділ зображення на сегменти.

Цей алгоритм працює за принципом дискретизації всього шляху на частини. Роботу алгоритму можна описати наступними кроками:

1. Отримуємо кольорове зображення з камери. (рис. 3)
2. Переведення зображення у відтінки сірого. (рис.4)

3. Зменшення розмірів зображення для прискорення роботи алгоритму. (рис.5)
4. Бінаризація зображення за допомогою алгоритму адаптивного порогу, для того щоб зменшити вплив освітлення.
5. Розбиваємо отримане зображення на горизонтальні частини висотою h пікселей. Чим більше буде висота полоси тим менш імовірним буде вплив шуму на зображенні. (рис.6)
6. На кожній частині шукаємо потенційні сегменти шляху. Пошук проводимо за припущенням що ширина сегменту шляху повинна бути більше ніж наступний сегмент.
7. Комбінуємо усі потенційні сегменти у дерево шляхів частина за частиною за наступними умовами:
 - а. Центр дочірнього сегмента має бути у межах батьківського сегмента.
 - б. Довжина дочірнього сегмента може бути більшою або дорівнювати довжині батьківського.

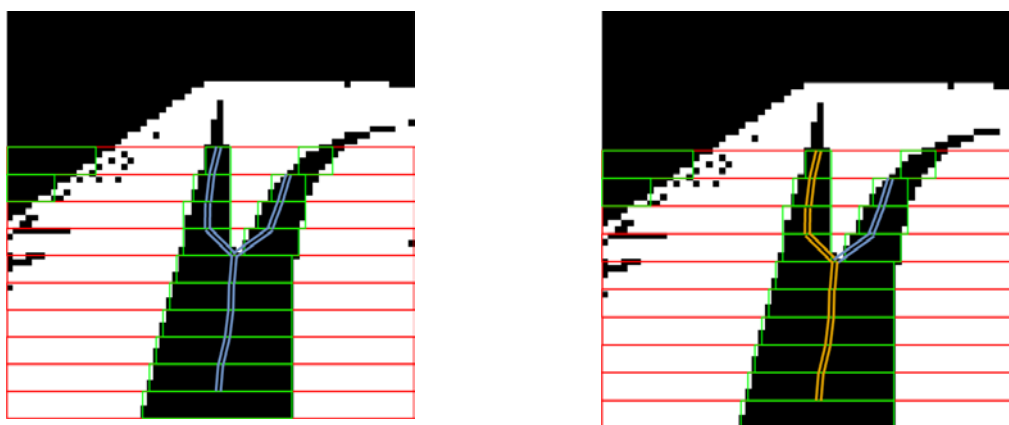


Рис. 7. Побудова і вибір гілки шляху для роздоріжжя.

8. В отриманому дереві шукаємо такий шлях, який задовольняє таким умовам (рис.7):
 - а. Кількість сегментів більша ніж n .
 - б. Зважений центр сегментів шляху знаходиться найближче до центру зображення. Однак алгоритм можна легко модифікувати на віддавання пріоритету лівим або правим шляхам.

Результат роботи розробленого алгоритму, вибір певного шляху на роздоріжжі, представлено на рис. 8.

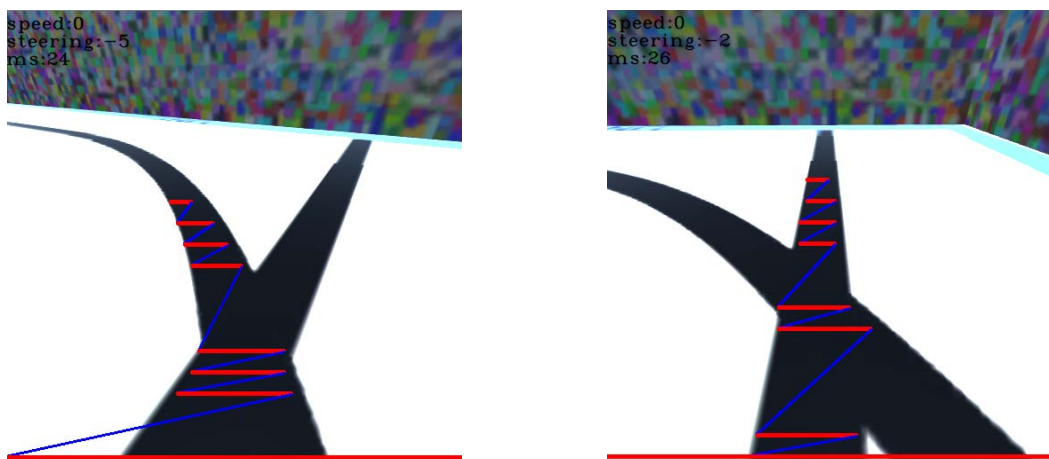


Рис. 8. Результат роботи алгоритму.

Даний алгоритм забезпечує досить швидкий пошук шляху, в межах 20-30 мс. Даний алгоритм було реалізовано на комп'ютерній моделі автомобіля. Віртуальна модель автомобіля успішно проїжджала запропоновані маршрути, повертаючи кермо на певний кут, який обчислювався відповідно до знайденого шляху.

Висновки

За результатами дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Проаналізовано сучасні системи автономного керування транспортним засобом та визначено засоби отримання інформації для автономної моделі автомобіля.
2. Визначено методи комп'ютерного зору для моделювання руху транспортного засобу по лінії та розпізнавання об'єктів на зображенні.
3. Спроектовано та розроблено модель автономного руху транспортного засобу по лінії з використанням технології комп'ютерного зору, який рухається за траєкторією, яка розраховується у реальному часі.

Представлений алгоритм можна використовувати для створення більш точної системи для керування автономними моделями автомобілів, а також для створення власних систем допомоги керування реальним транспортом з використанням камери та кишенькових комп'ютерів. Також одним із наступних завдань є розробка системи для виявлення дорожніх знаків на зображенні.

Список використаної літератури

1. Xiao B., Cheng J., Hancock E. R. *Graph-Based Methods in Computer Vision: Developments and Applications*. Hershey: IGI Global. 2013. 395 p. DOI: 10.4018/978-1-4666-1891-6.
2. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 1986. Vol. PAMI-8 . Issue 6. P. 679–698.
3. Iannino A. Hough transform theory and image processing experiments. Hoboken: Stevens Institute of Technology, 1980. 231 p.
4. Harris C. G., Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector. *Proceedings of the Alvey Vision Conference* (UK, Manchester, 31 August – 2 September, 1988), pp. 23.1–23.6. DOI:10.5244/C.2.23
5. Mikolajczyk K., Schmid C. Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors. *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 60. Issue 1. P. 63–86.
6. Lowe David G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 60. Issue 2. P. 91–110. DOI:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
7. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. Surf: Speeded up Robust Features. *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*. (Austria, Graz, May 7-13, 2006). Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. P. 404–417.
8. Гончаренко М. О. Сравнительный анализ методов формирования дескрипторов изображений в контексте задачи сегментации видеопотока. *Бионика Интеллекта*. 2015. № 2 (85). С. 90–94.
9. Deore S. P., Pravin A. Histogram of Oriented Gradients Based Off-Line Handwritten Devanagari Characters Recognition Using SVM, K-NN and NN Classifiers. *Revue d'Intelligence Artificielle*. 2019. Vol. 33. № 6. P. 441–446.
10. Сосновський В. А., Хлевний А. О. Аналіз та дослідження основних методів розпізнавання обличчя. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2019. № 35. С. 192–197.
11. Rojas R. *AdaBoost and the Super Bowl of Classifiers a Tutorial Introduction to Adaptive Boosting*. Berlin: Freie University, 2009. 6 p.

References

1. Xiao, B., Cheng, J., Hancock, & E. R. (2013). Graph-Based Methods in Computer Vision: Developments and Applications. Hershey: IGI Global. DOI: 10.4018/978-1-4666-1891-6.
2. Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. **PAMI-8**, 6, 679–698.
3. Iannino, A. (1980). Hough transform theory and image processing experiments. Hoboken: Stevens Institute of Technology.
4. Harris, C. G., & Stephens, M. (1988). A Combined Corner and Edge Detector. Proceedings of the *Alvey Vision Conference* (UK, Manchester, August 31 – September 2, 1988), pp. 23.1–23.6. DOI:10.5244/C.2.23.
5. Mikolajczyk, K., & Schmid, C. (2004). Scale & Affine Invariant Interest Point Detectors. *International Journal of Computer Vision*. **60**, 1, 63–86.
6. Lowe, David G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. **60**, 2, 91–110. DOI:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
7. Bay, H., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2006). Surf: Speeded up Robust Features. Proceedings of the *European Conference on Computer Vision*. (Austria, Graz, May 7-13, 2006). Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 404–417.
8. Goncharenko, M. O. (2014). Sravnitelnyiy analiz metodov formirovaniya deskriptorov izobrazheniy v kontekste zadachi segmentatsii videopotoka. *Bionika Intellekta*. **2** (85), 90–94.
9. Deore, S. P., & Pravin, A. (2019). Histogram of Oriented Gradients Based Off-Line Handwritten Devanagari Characters Recognition Using SVM, K-NN and NN Classifiers. *Revue d'Intelligence Artificielle*. **33**, 6, 441–446.
10. Sosnovskiy, V., & Khlevniy, A. (2019). Analiz ta doslidzhennia osnovnykh metodiv rozpiznavannia oblychchia. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 35, 192–197.
11. Rojas, R. (2009). AdaBoost and the Super Bowl of Classifiers a Tutorial Introduction to Adaptive Boosting. Berlin: Freie University.

Валько Наталія Валеріївна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри інформатики, програмної інженерії та економічної кібернетики Херсонського державного університету, e-mail: valko@ksu.ks.ua, ORCID: 0000-0003-0720-3217.

Болгарін Тимофій Олександрович – магістрант спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення, Херсонський державний університет, e-mail: Timofey45.16.95@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6026-7573.

Валько Катерина Віталіївна – студентка бакалавріату спеціальності 122 – Комп'ютерні науки, Київський Національний університет ім. Т.Г. Шевченка, e-mail: Katerynavalko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9746-018X.

УДК 539.39

В.О. ВАХНЕНКО, Д.Б. ВЕНГРОВИЧ
Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
О.В. МІЩЕНКО
Національний політехнічний інститут, Мехіко, Мексика

ДІАГНОСТИКА СТРУКТУРОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА ДОВГИМИ НЕЛІНІЙНИМИ ХВИЛЯМИ: ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Асимптотична усереднена модель запропонована для опису хвильових процесів у структурованих гетерогенних середовищах. Отримана інтегрально-диференціальна система рівнянь не може бути зведена до середніх величин (тиск, масова швидкість, питоми об'єм) і містить умови з характерними розмірами окремих компонентів.

На рівні мікроструктури середовища динамічна поведінка регулюється лише законами термодинаміки. На макрорівні рух середовища може бути описаний хвильово-динамічними законами для усереднених змінних з інтегро-диференціальним рівнянням стану, що містить характеристики мікроструктури середовища. Наведено точне математичне доведення, яке показує, що довгі хвилі кінцевої амплітуди реагують на структуру середовища таким чином, що модель однорідного середовища недостатня для опису поведінки структурованого середовища. Важливим результатом цієї моделі є те, що для хвилі з кінцевою амплітудою структура середовища (зокрема, існування мікротріщин) справляє нелінійні ефекти, навіть якщо окремі компоненти середовища описані лінійним законом. Пошук хвильових полів у структурованому середовищі є, з одного боку, прямою задачею.

З іншого боку, проаналізована система не виражається в середньому гідродинамічному вираженні; отже, динамічна поведінка середовища не може бути змодельована однорідним середовищем навіть для довгих хвиль, якщо ці хвилі нелінійні. Неоднорідність структури середовища завжди вносить додаткову нелінійність, яка не виникає в однорідному середовищі. Цей ефект дозволив сформулювати теоретичні підстави нового методу діагностики, що визначає характеристики гетерогенного середовища із застосуванням кінцевих амплітудних довгих хвиль (обернена задача). Цей метод діагностики також може бути використаний для пошуку масового вмісту окремих компонентів.

Ключові слова: асимптотична усереднена модель, структуроване середовище, нелінійні хвилі, метод діагностики.

В.А. ВАХНЕНКО, Д.Б. ВЕНГРОВИЧ
Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
А.В. МІЩЕНКО
Национальный политехнический институт, Мехико, Мексика

ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРИРОВАННОЙ СРЕДЫ ДЛИННЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЛНАМИ: ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Предложена асимптотическая усредненная модель для описания волновых процессов в структурированных неоднородных средах. Полученная интегрально-дифференциальная система уравнений не может быть приведена к средним слагаемым (давление, массовая скорость, удельный объем) и содержит слагаемые с характерными размерами отдельных компонентов.

На уровне микроструктуры среды динамическое поведение определяется только законами термодинамики. На макроуровне движение среды можно описать

волново-динамическими законами для усредненных переменных с интегро-дифференциальным уравнением состояния, содержащим характеристики микроструктуры среды. Приводится строгое математическое доказательство того, что длинные волны конечной амплитуды реагируют на структуру среды таким образом, что модель однородной среды недостаточна для описания поведения структурированной среды. Важный результат, вытекающий из этой модели, состоит в том, что для волны конечной амплитуды структура среды (в частности, наличие микротрещин) создает нелинейные эффекты, даже если отдельные компоненты среды описываются линейным законом. Нахождение волновых полей в структурированной среде является прямой задачей, с одной стороны.

С другой стороны, анализируемая система не выражена в средних гидродинамических терминах; следовательно, динамическое поведение среды не может быть смоделировано однородной средой даже для длинных волн, если эти волны нелинейны. Неоднородность структуры среды всегда вносит дополнительную нелинейность, которая не возникает в однородной среде. Этот эффект позволил сформулировать теоретические основы нового метода диагностики, определяющего характеристики неоднородной среды с использованием длинных волн конечной амплитуды (обратная задача). Этот метод диагностики также может быть использован для определения массового содержания отдельных компонентов.

Ключевые слова: асимптотическая усредненная модель, структурированная среда, нелинейные волны, метод диагностики.

V.O. VAKHNENKO, D.B. VENGROVICH

Subbotin Institute of Geophysics, Kyiv, Ukraine

O.V. MICHCHENKO

Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME-Zacatenco, Ciudad de México, México

THE DIAGNOSTICS OF A STRUCTURED MEDIUM BY LONG NONLINEAR WAVES: THEORETICAL JUSTIFICATION

The asymptotic averaged model is suggested for the description of the wave processes in structured heterogeneous media. The obtained integral differential system of equations cannot be reduced to the average terms (pressure, mass velocity, specific volume) and contains the terms with characteristic sizes of individual components.

On the microstructure level of the medium, the dynamical behavior is governed only by the laws of thermodynamics. On the macrolevel, the motion of the medium can be described by the wave-dynamical laws for the averaged variables with the integro-differential equation of state containing the characteristics of the medium microstructure. A rigorous mathematical proof is given to show that finite amplitude long waves respond to the structure of the medium in such a way that the homogeneous medium model is insufficient for the description of the behavior of the structured medium. An important result that follows from this model is that, for a finite-amplitude wave, the medium structure (in particular, existence of microcracks) produces nonlinear effects even if the individual components of the medium are described by a linear law. Finding the wave fields in the structured medium is the direct problem, on the one hand.

On the other hand, the system analyzed here is not expressed in the average hydrodynamical terms; hence the dynamical behavior of the medium cannot be modelled by a homogeneous medium even for long waves, if these waves are nonlinear. The heterogeneity of the medium structure always introduces additional nonlinearity that does not arise in a homogeneous medium. This effect enabled one to formulate the theoretical grounds of a new diagnostic method that determines the characteristics of a heterogeneous medium with the use

of finite-amplitude long waves (inverse problem). This diagnostic method can also be employed to find the mass contents of individual components.

Keywords: asymptotic averaged model, structured medium, nonlinear waves, diagnostics method.

Постановка проблеми

Більшість середовищ за умови локальної рівноваги можна вважати безструктурними. Традиційно припускають, що збурення з довжиною хвилі λ , що значно перевищує характерний розмір ε структурних неоднорідностей, поширюються в них, як в однорідних. Відомо, що з погляду механіки суцільного середовища можлива ідеалізація реального середовища за допомогою однорідного середовища. У багатьох випадках це дає змогу досягти значного успіху під час опису хвильових процесів.

Сучасний стан експериментальних досліджень потребує удосконалення моделей неоднорідних середовищ з детальним урахуванням їхньої структури. Реальні середовища не є однорідними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Як правило, для побудови моделей тією чи іншою мірою використовують формалізм механіки суцільного середовища. В таких випадках початковим є принцип локальної дії, що дає можливість перенести закони механіки точкової маси на суцільне середовище. Під час перетворення інтегральних рівнянь збереження у диференціальні рівняння припускають існування диференційно малого мікрооб'єму dv . З одного боку, цей об'єм настільки малий, що можна поширити закони механіки точкової маси на весь мікрооб'єм dv , з іншого – мікрооб'єм, хоч і малий порівняно з об'ємом усього середовища, все ж містить так багато структурних елементів середовища, що в цьому сенсі він може бути розглянутий як макроскопічний. Отже, перехід до диференціальних рівнянь збереження ґрунтується на такому припущенні: розмір мікроструктурних масштабів ε малий порівняно з характерним макроскопічним масштабом течії λ , що виправдовує граничний перехід $\varepsilon/\lambda \rightarrow 0$. Загалом стягування об'єму dv в точку є правильним для неперервних функцій. Це означає, що всі точки всередині диференційно малого об'єму еквівалентні. Тому еквівалентність точок у мікрооб'ємі обґрунтовує припущення про використання усереднених характеристик хвильового поля. Отже, рівняння руху можуть бути записані в усереднених характеристиках, таких як густина, масова швидкість, тиск, що властиві кожному окремому компоненту середовища. Зауважимо, що характерні структурні розміри окремих компонентів у цих моделях явно не фігурують.

У разі застосування моделей однорідного середовища до опису динамічних хвильових процесів у структурованому середовищі виникають деякі принципові труднощі. Тут структуру середовища розглянуто на макрорівні. Ми відмовилися від припущення, що диференційно малий об'єм dv містить усі компоненти середовища, хоч і розглянуто довгохвильові наближення, коли довжина хвилі λ набагато більша за характерну довжину структури середовища ε (рис. 1). Вважаємо, що окремо взятий компонент структурованого середовища моделюється однорідним середовищем (диференційно малий об'єм dv значно менший за характерний розмір окремого компонента). Згідно методу асимптотичного усереднення [1–2] з математичного аналізу, структура середовища безпосередньо впливає на нелінійні хвильові процеси навіть для збурень з довжиною хвилі, що значно перевищує розміри неоднорідностей. Математичне формулювання цього твердження означає, що система усереднених рівнянь не виражається в усереднених характеристиках (тиск, масова швидкість, питомий об'єм) і містить члени з характерним розміром окремих компонентів.

Елементарними неоднорідними середовищами, для яких можна проаналізувати вплив структури, є середовища з регулярною структурою. Регулярність структури і нелінійність досліджуваних хвильових процесів визначають вибір математичних моделей. Лінійні розміри тіла є значно більшими, ніж розмір неоднорідностей, проте неоднорідності настільки великі, що їхній стан описують класичними рівняннями суцільного середовища (рис. 1). Закономірності поширення довгохвильових збурень досліджуємо на прикладі середовища з регулярною структурою, вважаючи, що і напруження, і масова швидкість є неперервними функціями на межі сусідніх компонентів (див. рис. 1).

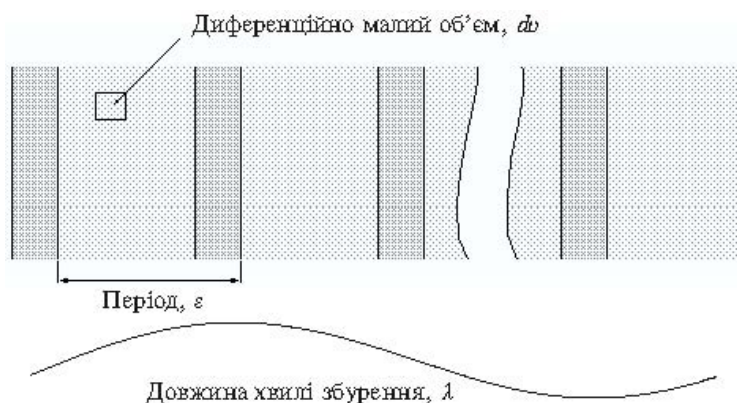


Рис. 1. Модель шарувато-неоднорідного середовища з двома однорідними компонентами в періоді.

Асимптотична природа усереднених методів стала зрозумілою відносно недавно. Процеси у середовищах з мікροструктурою математично можуть бути представлені із швидко осцилюючими коефіцієнтами. Метод усереднення найзручніше застосувати до середовищ з періодичною чи квазіперіодичною структурою. Тоді для середовищ з регулярною структурою коефіцієнти є періодичними функціями. Для вивчення динаміки поведінки середовищ регулярної структури застосовують асимптотичний метод усереднення рівнянь із швидко осцилюючими періодичними коефіцієнтами [1]. Метод був математично обґрунтований для опису механіки композитних матеріалів. Для опису динамічної поведінки багатокомпонентних середовищ на нижчому ієрархічному рівні у феноменологічному підході використовують методи суцільного середовища. При цьому вважають, що кожен мікрооб'єм перебуває в рівновазі (припущення про локальну рівновагу). Це робиться з метою введення термодинамічних величин – густини, тиску, енергії тощо. Динамічні процеси, у тому числі хвильові, характеризують ще такими величинами, як масова швидкість, швидкість поширення хвильових збурень, наприклад, ударної хвилі.

Мета дослідження

Сформулювати теоретичні основи методу діагностики, в якому визначаються характеристики гетерогенного середовища за допомогою довгих хвиль кінцевої амплітуди.

Викладення основного матеріалу дослідження

Кожен окремий компонент як неоднорідність у межах локальної рівноваги вдається описувати рівнянням руху суцільного середовища. Зрозуміло, що параметри потоку і характеристики середовища змінюються від компонента до компонента внаслідок індивідуальних властивостей компонентів, тоді як вигляд самих рівнянь руху залишається однаковим.

Обмежимося записом рівнянь руху для пласкої симетрії. Для аналізу хвильових течій всередині кожного компонента використаємо гідродинамічні рівняння, що виражають закон збереження маси та закон збереження імпульсу спільно з рівнянням стану:

$$\frac{\partial V}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial m} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial m} = 0, \quad dp = c^2 dm, \quad (1)$$

де $V = \rho^{-1}$ – питомий об’єм; u – масова швидкість; $dm = \rho_0 dx$ – масова лагранжева просторова координата.

Відповідно до поставленої задачі на межах компонентів немає розривів масової швидкості і тиску: $[u]=0$, $[p]=0$. Рівняння записано в лагранжевих координатах, оскільки вони пов’язані з елементом маси середовища. Для застосування методу асимптотичного усереднення важливим є те, що в цих змінних структура стисливого середовища є сталою в процесі деформування.

Застосуємо асимптотичний метод усереднення до рівнянь руху. Незалежну змінну $m = s + \varepsilon \xi$ відповідно до методу багатьох масштабів розбиваємо на повільну s і швидко ξ змінні, тут ε – безрозмірний період структури. Нові змінні s і ξ вважаємо незалежними змінними. Тоді початкову похідну запишемо у вигляді $\frac{\partial}{\partial m} = \frac{\partial}{\partial s} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial \xi} = 0$. Повільна змінна s відповідає глобальній зміні хвильових полів, а швидка змінна ξ – їхній локальній зміні. Розв’язки p , V , u шукаємо у вигляді рядів за степенями періоду структури ε з функціями, періодичними за ξ , наприклад: $V(m,t) = V^{(0)}(s,t,\xi) + \varepsilon V^{(1)}(s,t,\xi) + \varepsilon^2 V^{(2)}(s,t,\xi) + \dots$. Після усереднення за періодом структури ξ отримуємо усереднену систему рівнянь [1]:

$$\frac{\partial \langle V^{(0)} \rangle}{\partial t} - \frac{\partial u^{(0)}}{\partial s} = 0, \quad \frac{\partial u^{(0)}}{\partial t} + \frac{\partial p^{(0)}}{\partial s} = 0, \quad d \langle V^{(0)} \rangle = - \langle (V^{(0)})^2 / c^2 \rangle dp. \quad (2)$$

За означенням $\langle \cdot \rangle = \int_0^1 (\cdot) d\xi$. Надалі обмежимося тільки нульовим наближенням, а верхній індекс (0) опускаємо. Тиск $p^{(0)}$ і масова швидкість $u^{(0)}$ не залежать від швидкої змінної ξ , чого не можна сказати про питомий об’єм $V^{(0)} = V^{(0)}(\xi)$. На великому масштабі s дія збурень проявляється в хвильовому русі середовища, тоді як на мікромасштабі ξ дія є однорідною (безхвильовою) на всьому періоді структури середовища через те, що тиск і масова швидкість на всьому періоді є сталими величинами.

Рівняння (2) були виведені для строго періодичного середовища. Проте можна довести, що вони також будуть справедливими для середовищ з квазіперіодичною структурою. Дійсно, тиск p і масова швидкість u не залежать від швидкої змінної ξ . Тому на мікрорівні дія зовнішнього навантаження статично однорідна (безхвильова) на всьому періоді структурованого середовища. Однак на повільному масштабі s ця дія проявляється у хвильовому русі середовища. На мікрорівні поведінка середовища підпорядковується тільки термодинамічним законам. Там спостерігається механічна рівновага. Водночас на макрорівні рух середовища описується законами хвильової

динаміки для усереднених змінних. З математичної позиції в нульовому порядку за ε розмір періоду вважаємо нескінченно малим, тобто маємо наближення $\varepsilon \rightarrow 0$. Це означає, що місцезнаходження окремих компонентів у періоді не має ніякого значення, однак масовий вміст кожного компонента повинен зберігатися. В результаті решта усереднених характеристик для середовищ з періодичною та квазіперіодичною структурою збігатиметься. Це означає, що довгохвильові рухи не відрізнятимуться між собою в періодичних, квазіперіодичних і статистично однорідних середовищах.

Структура середовища впливає на хвильові поля. Водночас виникає питання, чи достатньо інформації міститься в хвильовому полі, щоб відтворити структуру середовища. Це – обернена задача. З'ясувалося, що, визначивши хвильові поля, з певною точністю можна діагностувати концентрацію окремих компонентів.

Доведемо, що нелінійні ефекти у структурованих середовищах збільшуються порівняно з однорідним середовищем. Розглянемо еволюційне рівняння зі слабкою нелінійністю і порівняємо коефіцієнти нелінійності для цих середовищ. Запишемо еволюційне рівняння в ейлеровій системі координат, що містить слабку нелінійність. Перш за все, зазначимо, що масова швидкість u пов'язана з тиском p співвідношенням

$$u = \int_{p_0}^p \sqrt{\langle V^2/c^2 \rangle} dp. \quad \text{Функціональна залежність усередненого питомого об'єму від}$$

приросту тиску $p' = p - p_0$ з точністю до членів другого порядку $O(p'^2)$ розвивається в ряд:

$$\langle V \rangle(p) = \langle V \rangle_0 + \left. \frac{d\langle V \rangle}{dp} \right|_{p=p_0} p' + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\langle V \rangle}{dp^2} \right|_{p=p_0} p'^2.$$

Систему рівнянь (2) тоді можна переписати так:

$$\langle V \rangle_0 \frac{\partial u}{\partial x} + \left\langle \frac{V^2}{c^2} \right\rangle_0 \frac{\partial p'}{\partial t} - \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\langle V \rangle}{dp^2} \right|_{p=p_0} \frac{\partial p'^2}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \langle V \rangle_0 \frac{\partial p'}{\partial x} = 0.$$

Для виведення першого рівняння було використано співвідношення $u \frac{\partial p'}{\partial x} = p' \frac{\partial u}{\partial x}$, яке справедливе з прийнятою точністю $O(p'^2)$ і впливає з еволюційного рівняння для однієї змінної:

$$\langle V \rangle_0^2 \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} - \left\langle \frac{V^2}{c^2} \right\rangle_0 \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\langle V \rangle}{dp^2} \right|_{p=p_0} \frac{\partial^2 p'^2}{\partial t^2} = 0.$$

Надалі індекс 0, що позначає незбурений стан, опускаємо. Після факторизації, розглядаючи хвилі, що поширюються в один бік, маємо еволюційне рівняння в ейлеровій системі координат:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} + c_{\text{eff}} \frac{\partial p'}{\partial x} + \frac{1}{2} \langle V \rangle \left\langle \frac{V^2}{c^2} \right\rangle^{-3/2} \frac{d^2\langle V \rangle}{dp^2} p' \frac{\partial p'}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

Коефіцієнт нелінійності α_p , зумовлений структурою середовища, для випадку $dc/dp = 0$ можна подати у такому вигляді:

$$\alpha_p \equiv \frac{1}{2} \langle V \rangle \left\langle \frac{V^2}{c^2} \right\rangle^{-3/2} \frac{d^2 \langle V \rangle}{dp^2} = \frac{d(u + c_{eff})}{dp} = \langle V \rangle \left\langle \frac{V^3}{c^4} \right\rangle \left\langle \frac{V^2}{c^2} \right\rangle^{-3/2}.$$

Причому завжди $\alpha_p > 0$. Для однорідного середовища $dc/dp = 0$ маємо $\alpha_{phom} = V/c$. Винятковими середовищами є неоднорідні середовища, в яких величина V/c^2 не змінюється на періоді. Для таких середовищ неоднорідність не вносить додаткової нелінійності порівняно з однорідними. Такі структуровані середовища поведуться подібно до однорідних середовищ під час поширення нелінійних хвиль.

Розглянемо відношення коефіцієнтів нелінійності для структурованого і однорідного середовищ, заздалегідь узгодивши їхні властивості. Мається на увазі, що у просторі безрозмірних нормованих змінних при $p = p_0$ задано $\langle V \rangle_0 = 1$, а також $\left\langle \frac{V^2}{c^2} \right\rangle_0 = 1$ для середовищ, які ми порівнюємо. Тому

$$\frac{\alpha_p}{\alpha_{phom}} = \langle V \rangle \left\langle \frac{V^3}{c^4} \right\rangle \left\langle \frac{V^2}{c^2} \right\rangle^{-2} \geq 1. \quad (4)$$

Нерівність (4) є ніщо інше, як відома нерівність Коші–Шварца (див. формули (4.6–60), (15.2–3) і розділ 14.2–6 у праці [3]). Врахувавши, що $\langle V \rangle \geq 0$, $\left\langle \frac{V^2}{c^2} \right\rangle \geq 0$, доведемо, що

$$\begin{aligned} \langle V \rangle \left\langle \frac{V^3}{c^4} \right\rangle &\equiv \int_{-\infty}^{\infty} V d\xi \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V^3}{c^4} d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V^2}{c^2} \left(\frac{V}{c^2} \right)^{-1} d\xi \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V^2}{c^2} \frac{V}{c^2} d\xi \\ &\geq \left(\int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\frac{V^2}{c^2} \left(\frac{V}{c^2} \right)^{-1}} \cdot \sqrt{\frac{V^2}{c^2} \frac{V}{c^2}} d\xi \right)^2 = \left(\int_{-\infty}^{\infty} \frac{V^2}{c^2} d\xi \right)^2 \equiv \left\langle \frac{V^2}{c^2} \right\rangle^2 \end{aligned}$$

Залишилося визначити умову, коли виконується знак рівності. Для цього скористаємося векторним записом нерівності Коші–Шварца (див. формулу (14.2-5) у праці [3]) $|(\vec{a}, \vec{b})|^2 \leq (\vec{a}, \vec{a})(\vec{b}, \vec{b})$, причому знак рівності реалізується тоді і лише тоді, коли вектори \vec{a} і \vec{b} колінеарні, тобто $\vec{a} = k\vec{b}$ ($k = \text{const}$). У нашому випадку це означає, що

$$\sqrt{\frac{V^2}{c^2} \left(\frac{V}{c^2} \right)^{-1}} / \sqrt{\frac{V^2}{c^2} \frac{V}{c^2}} = \text{const}.$$

Таким чином, знак рівності виконується тоді і лише тоді, коли $V/c^2 = \text{const}$, тобто $V(\xi)/(c(\xi))^2 \neq f(\xi)$ не змінюється на періоді. Якщо величина V/c^2 змінюється на періоді, тоді для решти середовищ з мікроструктурою виконується нерівність (4). Констатуємо, що в структурованому середовищі коефіцієнт нелінійності α_p завжди більший, ніж в однорідному α_{phom} , тобто доведено, що структура середовища, в

загальному випадку, вносить додаткову нелінійність. Зараз покажемо, яким чином зазначений ефект можна використати для розробки математичних основ нового методу діагностики, в якому властивості багатокomпонентного середовища вдається визначити за особливостями поширення довгих нелінійних хвиль.

Опишемо метод діагностики структури середовища, якщо відомі закономірності поширення хвиль [2]. Зазначимо одну важливу особливість. Оскільки в асимптотичній усередненій моделі період структури вважаємо нескінченно малим відносно довжини хвилі, тому в запропонованому методі діагностики місцеположення елементів структури на періоді не вдається вказати точно. Робимо висновок, що дві структури, які відрізняються одна від одної функціональною залежністю $V/c^2 = V/c^2(\zeta)$ від ζ , наприклад, ті, що показані на рис. 2, мають однаково впливати на рух хвилі.

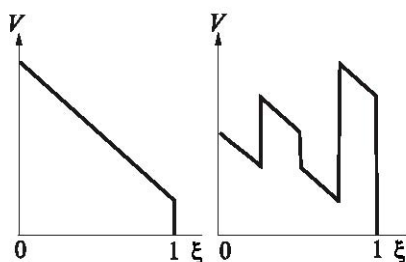


Рис. 2. Еквівалентні розподіли питомого об'єму в елементарній комірці з позиції методу діагностики.

Отже, такі середовища неможливо розрізнити за допомогою довгих нелінійних хвиль. Врахувавши це обмеження, надалі для визначеності вважатимемо, що залежність $V/c^2 = V/c^2(\zeta)$ від швидкої ейлерової координати $\zeta \equiv x/\varepsilon$ є спадною інтегрованою взаємно однозначною функцією на відрізку $\zeta \in [0,1]$, а поза ним дорівнює нулю. Змінну $\zeta \equiv x/\varepsilon$ визначаємо так само, як і швидку змінну для лагранжевих координат $\xi \equiv m/\varepsilon$. Доведемо, що функцію $\zeta = \zeta(V/c^2)$, обернену до шуканої $V/c^2 = V/c^2(\zeta)$, можна визначити через обернене Фур'є-перетворення:

$$\zeta(V/c^2) = F^{-1} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\langle V(V/c^2)^{n+1} \rangle}{(n+1)! \langle V \rangle} i^n q^n \right] (V/c^2). \quad (5)$$

Коефіцієнти $\langle V(V/c^2)^n \rangle \equiv \int_{-\infty}^{\infty} V(V/c^2)^n d\xi$. ($n=3,4,\dots$) для цієї формули легко обчислити, якщо знати функціональну залежність $\langle V \rangle$ від p або $\langle V^2/c^2 \rangle$ від p . Їх послідовно визначають з рекурентного співвідношення:

$$\frac{d \langle V(V/c^2)^n \rangle}{dp} = -(n+1) \langle V(V/c^2)^{n+1} \rangle,$$

яке впливає безпосередньо з рівняння стану. Середнє значення $\langle V \rangle$, як наголошено раніше, однозначно пов'язане з густиною середовища в ейлерових координатах.

Скористаємося відомим фактом з теорії ймовірностей [3]. Функцію розподілу $f(x)$ (однозначну інтегровану невід’ємну функцію) запишемо через її центральні моменти $\alpha_n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n f(x) dx$ з використанням характеристичної функції $\chi(q) = F[f(x)](q)$, де $F[\cdot]$ – Фур’є-перетворення. Отже, довільну невід’ємну інтегровану функцію можна записати так: $f(x) = F^{-1}[\chi(q)](x)$. Використаємо відомий факт [3], що центральні моменти α_n

однозначно визначають характеристичну функцію $\chi(q) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n i^n \frac{q^n}{n!}$. Тому $f(x) = F^{-1}\left[\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n i^n \frac{q^n}{n!}\right](x)$. Ці відомості з теорії ймовірностей [3] застосуємо, щоб

довести таке твердження: якщо $V/c^2 = V/c^2(\zeta)$ є позитивна інтегрована функція на скінченному відрізку і, крім того, монотонно спадає, а поза відрізком дорівнює нулю, тоді обернену функцію щодо заданої вдається відтворити формулою (5) через середні значення $\langle V(V/c^2)^n \rangle \equiv \int_{-\infty}^{\infty} V(V/c^2)^n d\xi$. Дійсно, для монотонної і однозначної функції

$V/c^2 = V/c^2(\zeta)$ можна в останньому інтегралі перейти до оберненої функції $\zeta = \zeta(V/c^2)$, оскільки якобіан перетворення не дорівнює нулю. Тоді маємо

$$\begin{aligned} \langle V(V/c^2)^n \rangle &= \int_0^1 V(\xi) \left(\frac{V}{c^2}\right)^n d\xi = \langle V \rangle \int_0^1 V \left(\frac{V}{c^2}\right)^n \rho d\zeta = \\ &= \langle V \rangle \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{V}{c^2}\right)^n \frac{d\zeta}{d(V/c^2)} d(V/c^2) \end{aligned}$$

Геометрично це співвідношення відображує інтегрування на області між кривою $V/c^2 = V/c^2(\zeta)$ і осями координат $O\zeta$ та $O(V/c^2)$, що можна здійснити інтегруванням як за ζ , так і за V/c^2 . Однозначність при цьому виконується для монотонно спадної функції $V/c^2 = V/c^2(\zeta)$.

Проведемо перетворення з урахуванням того, що функція $\zeta = \zeta(V/c^2)$ є визначеною на скінченному відрізку, додатною та обмеженою зверху:

$$\begin{aligned} \langle V(V/c^2)^n \rangle &= \langle V \rangle \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{V}{c^2}\right)^n \frac{d\zeta}{d(V/c^2)} d(V/c^2) = \\ &= -n \langle V \rangle \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{V}{c^2}\right)^{n-1} \zeta d(V/c^2) \end{aligned}$$

У цьому співвідношенні значення $\alpha_n = \langle V \rangle \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{V}{c^2}\right)^n \frac{d\zeta}{d(V/c^2)} d(V/c^2)$ є ніщо інше, як центральні моменти оберненої функції. Тому останнє співвідношення набуває вигляду $\langle V(V/c^2)^n \rangle = -n \langle V \rangle \alpha_{n-1}$. Отже, характеристична функція $\chi(q)$, оберненої функції $\zeta = \zeta(V/c^2)$ виражається через $\langle V(V/c^2)^n \rangle$ за формулою

$$\chi(q) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\langle V(Vc^{-2})^{n+1} \rangle}{(n+1)! \langle V \rangle} i^n q^n. \quad (6)$$

Застосувавши обернене перетворення Фур'є, остаточно одержуємо формулу (5).

Отже, одержано основне співвідношення (5) для методу діагностики, яке дає змогу визначити властивості окремих елементів структурованого середовища за допомогою нелінійних довгих хвиль.

Для прикладу на рис. 3 представлено розрахункові результати з визначення структури шарувато-періодичного середовища, яке належним чином можна наблизити до діагностованого середовища.

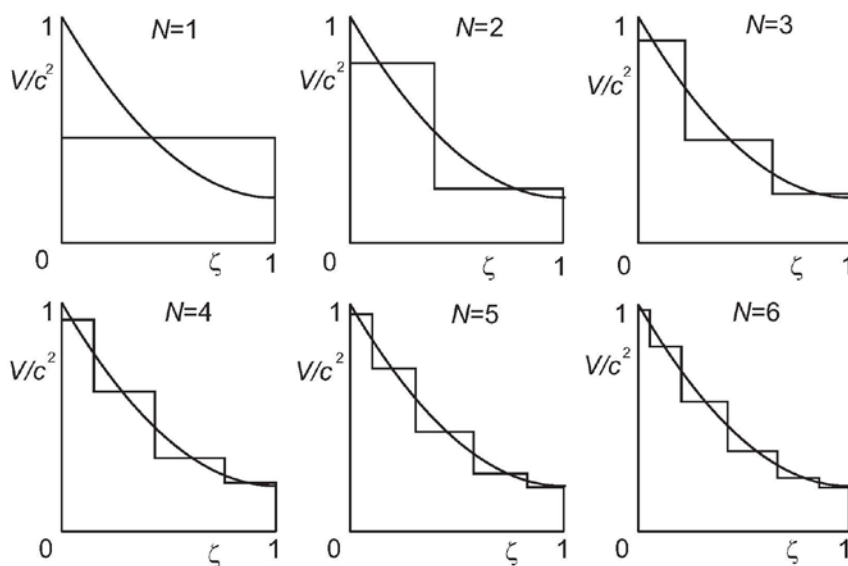


Рис. 3. Наближення періодично-неоднорідного середовища з розподілом в періоді $V/c^2 = 0,2 + 0,8(1-\zeta)^2$ шарувато-періодичними середовищами (N – число прошарків на періоді)

Таким чином, теоретично обґрунтовано метод діагностики властивостей середовищ довгими нелінійними хвилями в рамках асимптотичної усередненої моделі структурованого середовища. Показано, що за допомогою запропонованого методу можна апроксимувати діагностовне середовище N -компонентним середовищем і визначити масовий вміст цих компонентів.

Висновки.

Для опису хвильових процесів в гетерогенному середовищі запропонована асимптотична усереднена модель. На мікроструктурному рівні середовище описується лише законами термодинаміки. На макрорівні рух середовища може бути описаний законами хвильової динаміки для усереднених змінних. Неоднорідність середовища завжди вносить додаткову нелінійність. Цей ефект дозволив сформулювати теоретичні основи методу діагностики, в якому визначаються характеристики гетерогенного середовища за допомогою довгих хвиль кінцевої амплітуди.

Список використаної літератури

1. Vakhnenko V. O., Danylenko V. A., Michtchenko A. V. An Asymptotic Averaged Model of Nonlinear Long Waves Propagation in Media with a Regular Structure. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 1999. Vol. 34. Issue 4. P. 643–654. DOI: 10.1016/S0020-7462(98)00014-6.
2. Vakhnenko V. O., Danylenko V. A., Michtchenko A. V. Diagnostics of the Medium Structure by Long Wave of Finite Amplitude. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2000. Vol. 35. Issue 6. C. 1105–1113.
3. Korn G., Korn T. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. New York, San Francisco, Toronto, London, Sydney: McGraw-Hill Book Company, 1968. 720 p. DOI: 10.1002/zamm.19690490921 DOI: 10.1016/S0020-7462(99)00082-7.

References

1. Vakhnenko, V. O., Danylenko, V. A., & Michtchenko, A. V. (1999). An Asymptotic Averaged Model of Nonlinear Long Waves Propagation in Media with a Regular Structure. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 34, 4, 643–654. DOI: 10.1016/S0020-7462(98)00014-6.
2. Vakhnenko, V. O., Danylenko, V. A., & Michtchenko, A. V. (2000). Diagnostics of the Medium Structure by Long Wave of Finite Amplitude. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 35, 6, 1105–1113.
3. Korn G., & Korn T. (1968). *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. New York, San Francisco, Toronto, London, Sydney: McGraw-Hill Book Company. DOI: 10.1002/zamm.19690490921 DOI: 10.1016/S0020-7462(99)00082-7.

Вахненко В'ячеслав Олексійович – д.ф.-м.н., завідувач відділу ДТДТ, Інститут геофізики імені С.І. Субботіна НАН України, вул. академіка Палладіна, 32, Київ-03680, Україна, 03680, e mail: vakhnenko@ukr.net. ORCID: 0000-0002-1250-9563.

Венгрович Дмитро Богданович – к.ф.-м. н., завідувач Відділення геодинаміки вибуху, Інститут геофізики імені С.І. Субботіна НАН України, вул. академіка Палладіна, 32, Київ-03680, Україна, 03680, e mail: vengrovich@gmail.com. ORCID: 0000-0002-1901-5697.

Міщенко Олександр Володимирович – к.ф.-м.н., професор, Національний політехнічний інститут, SEPI-ESIME-Zacatenco, Мехіко, С.Р. 07738, Мексика, e-mail: almitchen@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3799-581X.

УДК 004.942

С.В. ВОРОНЕНКО, О.В. СУББОТИН
Херсонська державна морська академія
Ю.О. ЛЕБЕДЕНКО, Г.В. РУДАКОВА
Херсонський національний технічний університет

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СУДОВОЮ КОМПЛЕКСНОЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ ТУРБОКОМПРЕСОРНОЮ УСТАНОВКОЮ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ

Розглянуто вплив зовнішніх факторів на ефективність роботи системи керування судовою комплексною електроенергетичною турбокомпресорною установкою, в якій енергія відпрацьованих газів використовується безпосередньо для приводу газової турбіни, яка передає енергію на привід нагнітача або на привід генератора. Виконано аналіз ефективності турбокомпресорних систем в різних кліматичних умовах. Отримано модель комбінованої турбокомпресорної установки, що дозволяє проводити моделювання процесів у системі у будь-яких перехідних режимах та проводити аналіз ефективності систем керування, побудованих за різними принципами. На основі аналізу процесів, що відбуваються в турбокомпресорній системі в перехідних режимах роботи, можна оцінити ефективність певних регуляторів в мінливих кліматичних умовах. Для моделювання залежності зміни потужності морських дизельних установок від температури та вологості та залежності питомої витрати палива від температури зовнішнього повітря на вході низькооборотного дизеля та потужності двигуна були використані регресійні моделі. Проведено імітаційні експерименти за допомогою комп'ютерного моделювання дизельного двигуна з базовою версією звичайного турбокомпресора та із запропонованим гібридним з короткочасним накидом навантаженням 20% при різних значеннях вологості та температури навколишнього середовища. Як видно з результатів, підвищення температури і вологості погіршують ефективність дизельного двигуна і призводять до збільшення споживання палива, а використання додаткового наддування скорочує час перехідних режимів і, отже, зменшує втрати палива в таких випадках. Подальше підвищення ефективності роботи системи нагнітання можливе за рахунок зміни параметрів регулювання контуру регулювання додаткового нагнітання, тобто впровадження адаптивної системи керування комплексною електроенергетичною турбокомпресорною установкою.

Ключові слова: турбокомпресорна система; зовнішні фактори; імітаційне моделювання; система керування; судова енергетична установка.

С.В. ВОРОНЕНКО, А.В. СУББОТИН
Херсонская государственная морская академия
Ю.А. ЛЕБЕДЕНКО, А.В. РУДАКОВА
Херсонский национальный технический университет

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТУРБОКОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

Рассмотрено влияние внешних факторов на эффективность работы системы управления судовой комплексной электроэнергетической турбокомпресорной установкой, в которой энергия отработавших газов используется непосредственно для привода газовой турбины, передающей энергию на привод нагнетателя или на

привод генератора. Выполнен анализ эффективности турбокомпрессорных систем в различных климатических условиях. Получена модель комбинированной турбокомпрессорной установки. Эта модель позволяет проводить моделирование процессов в системе в любых переходных режимах и проводить анализ эффективности систем управления, построенных по разным принципам. На основе анализа процессов, происходящих в турбокомпрессорной системе в переходных режимах работы, можно оценить эффективность определенных регуляторов в меняющихся климатических условиях. Для моделирования зависимости изменения мощности морских дизельных установок от температуры и влажности и зависимости удельного расхода топлива от температуры наружного воздуха на входе низкооборотного дизеля и мощности двигателя были использованы регрессионные модели. Проведены имитационные эксперименты с помощью компьютерного моделирования дизельного двигателя с базовой версией обычного турбокомпрессора и с предложенным гибридным, с кратковременным набросом нагрузки 20% при различных значениях влажности и температуры окружающей среды. Как видно из результатов, повышенная температура и влажность ухудшают эффективность дизельного двигателя и приводят к увеличению потребления топлива, а использование дополнительного наддува сокращает время переходных режимов и, следовательно, уменьшает потери топлива в таких случаях. Дальнейшее повышение эффективности работы системы нагнетания возможно за счет изменения параметров регулирования контура регулирования дополнительного нагнетания, то есть внедрение адаптивной системы управления комплексной электроэнергетической турбокомпрессорной установкой.

Ключевые слова: турбокомпрессорная система; внешние факторы; имитационное моделирование; система управления; судовая энергетическая установка.

S.V. VORONENKO, O.V. SUBBOTIN
Kherson State Maritime Academy
YU.O. LEBEDENKO, H.V. RUDAKOVA
Kherson National Technical University

ANALYSIS OF THE CONTROL SYSTEM EFFICIENCY OF THE SHIP INTEGRATED ELECTRICITY INSTALLING TURBO WITH THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS

The influence of external factors on the efficiency of the control system of a marine complex electric power turbocharger plant using exhaust gas energy directly to drive a gas turbine with the subsequent transfer of energy to the drive of the supercharger or to the drive of the generator is considered. The analysis of the efficiency of turbocharger systems in different climatic conditions is carried out. A model of a combined turbocharger unit has been obtained, which allows modeling processes in the system in any transient modes and analyzing the effectiveness of control systems built according to different principles. Based on the analysis of the processes occurring in the turbocharger system in transient operating modes, it is possible to evaluate the effectiveness of certain regulators in changing climatic conditions. Regression models were used to simulate the dependence of the change in the power of marine diesel installations on temperature and humidity and the dependence of the specific fuel consumption on the temperature of the outside air at the inlet of a low-speed diesel engine and engine power. Simulation experiments were carried out using computer modeling of a diesel engine with a basic version of a conventional turbocharger and with the proposed hybrid, with a short-term load surge of 20% at various values of humidity and

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.5

ambient temperature. As can be seen from the results, higher temperature and humidity deteriorate the efficiency of the diesel engine and lead to increased fuel consumption, and the use of additional boost reduces the transient times and, therefore, reduces fuel losses in such cases. A further increase in the efficiency of the pumping system is possible by changing the control parameters of the additional pumping control loop, that is, the introduction of an adaptive control system for an integrated electric power turbocharger unit.

Keywords: turbocharger system; additional supercharging circuit; simulation modeling; control system; marine power plant.

Постановка проблеми

В даний час для підвищення ефективності суднових енергетичних установок (СЕУ) широко застосовуються системи відбору тепла відпрацьованих газів [1]. Одним з перспективних напрямків утилізації тепла відпрацьованих газів є використання турбокомпресорних систем, у яких енергія відпрацьованих газів використовується безпосередньо для приводу газової турбіни, що передає енергію на привод компресора наддуву або на привод електрогенератора [2]. Однак, на роботу такого складного комплексу, як суднова комплексна електроенергетична турбокомпресорна установка (СКЕЕТКУ), суттєво впливають зовнішні фактори, що може спричинити проблеми з підтриманням високої економічності та ефективності комплексного використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) суднової енергетичної установки (СЕУ) в зв'язку з невідповідністю налаштування параметрів систем керування. Тому необхідно виконати аналіз ефективності роботи СКЕЕТКУ в різних кліматичних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Отримана модель СКЕЕТКУ [3] дозволяє здійснювати моделювання процесів в системі при будь-яких перехідних режимах та проводити аналіз ефективності систем керування, побудованих за різними принципами. При побудові математичної моделі СКЕЕТКУ як об'єкту керування розглянуто взаємозв'язки між окремими складовими компонентами комплексу (рис. 1) [4].

До складу комплексу входять окремі підсистеми:

- головна (дизельна) енергетична установка (ГЕУ) з турбонаддувом, у склад якої входять головний двигун (ГД), турбокомпресор (ТК), впускний та випускний трубопроводи (ВпТП та ВипТП);

- система автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧО) валу головного двигуна, яка призначена для стабілізації (підтримання) частоти обертання валу головного двигуна на певному (заданому) значенні;

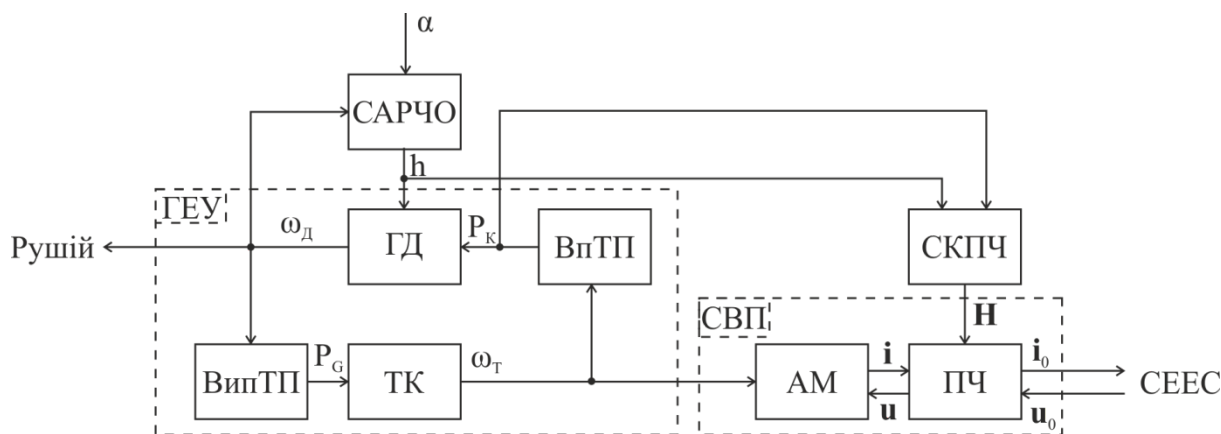


Рис. 1. Схема взаємозв'язків між складовими компонентами СКЕЕТКУ.

- система відбору потужності (СВП), в якій як генератор, на відміну від відомих розробок [5], використано асинхронну машину (АМ) з масивним ротором, яка (за потребою) може бути перемкнута у режим двигуна завдяки застосуванню належного перетворювача частоти (ПЧ) зі власною системою керування (СКПЧ).

Для дослідження ефективності застосування гібридної турбокомпресорної установки шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі імітаційного моделювання [6] складено блок-схему моделі СКЕЕТКУ рис. 2).

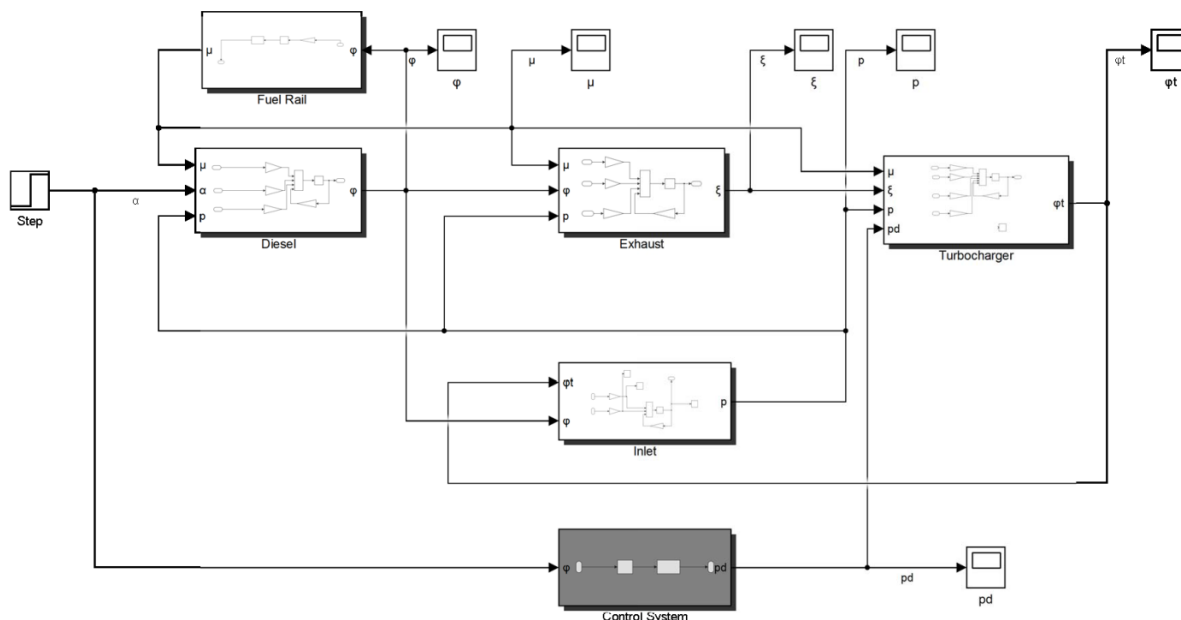


Рис. 2. Загальний вигляд моделі з гібридним турбокомпресором.

Блок-схеми окремих підсистем моделі показано на рис. 3.

Математична модель СКЕЕТКУ, яка будується з розглянутих моделей компонентів, надає можливість аналізувати процеси, що протікають в системі шляхом здійснення імітаційного моделювання роботи СКЕЕТКУ для реальної суднової установки, не тільки в різних режимах роботи, а й при зміні кліматичних умов.

Мета дослідження

Метою досліджень є аналіз процесів, що протікають в СКЕЕТКУ в перехідних режимах роботи, та оцінка ефективності застосування певних регуляторів при змінах кліматичних умов.

Викладення основного матеріалу дослідження

Протягом рейсу температури зовнішнього повітря $t_{ЗП}$ і забортної води, що охолоджує наддувне повітря після ТК, змінюються дуже істотно [7]. Згідно зі статистичними даними, найбільш ймовірний діапазон зміни параметрів навколишнього середовища становить:

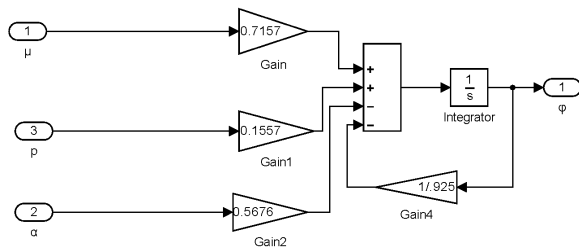
- температура охолоджуючої води t_0 від 20 до 40 ° С;
- атмосферний тиск $p_0 = 660-775$ мм рт. ст. ;
- відносна вологість $\psi = 0,35-1$;
- температура зовнішнього повітря $t_{ЗП0} = 5-30$ ° С.

Згідно ГОСТ Р 525217-2005 (ISO 3046-1: 2002) [8] нормальними умовами є наступні:

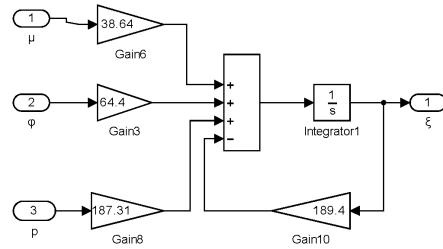
- атмосферний тиск $p_{н.у} = 100$ кПа (760 мм рт. ст.);

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.5

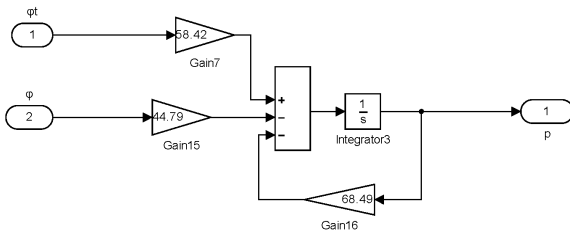
- температура навколишнього повітря $T_{н.у} = 298 \text{ K} (25^\circ \text{ C})$;
- температура охолоджуючої води на вході в повітроохолоджувач $T_{с_{н.у}}=298\text{K} (25^\circ\text{C})$;
- відносна вологість $\psi_{н.у} = 0,3$.



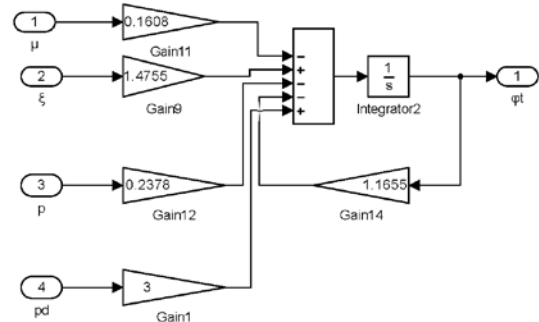
а) Модель дизеля



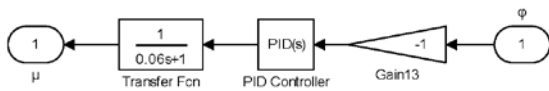
б) Модель випускного колектора



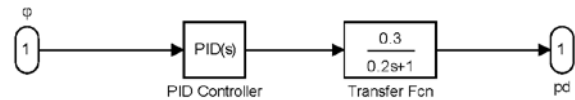
в) Модель випускного колектора



г) Модель гібридного турбокомпресора



д) Модель паливної рейки



е) Модель системи керування

Рис. 3. Моделі підсистем СКЕЕТКУ.

1. Урахування впливу кліматичних умов на параметри пропульсивного комплексу.

Номінальна потужність дизеля гарантується виробником при певних атмосферних умовах:

- температурі повітря $t_{п0} = 20^\circ\text{C}$,
- атмосферному тиску $P_{a0} = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ і
- відносній вологості повітря $\varphi_0 = 50 \%$.

Однак в умовах експлуатації температура в машинному відділенні змінюється від $+15^\circ \text{ C}$ до $+45^\circ \text{ C}$ при відносній вологості $\varphi = 70..100 \%$. Зміна атмосферного тиску істотного впливу не надає [7]. Залежності зміни потужності суднових дизельних установок від температури і вологості показано на рис. 4, а [7].

В [9] наведено аналітичну залежність (див. рис. 4, б) відносної потужності дизеля $k_N = N_e / N_{enom}$ від температури $t_{п}$, $^\circ\text{C}$, і вологості φ , $\%$, навколишнього середовища виду

$$k_N = 1.084 - \frac{0.008 \cdot \varphi}{100} - 0.004 \cdot t_{п}, \quad (1)$$

де N_e – фактичне значення потужності двигуна; $N_{енот}$ – номінальна потужність двигуна, яка гарантується виробником при певних атмосферних умовах.

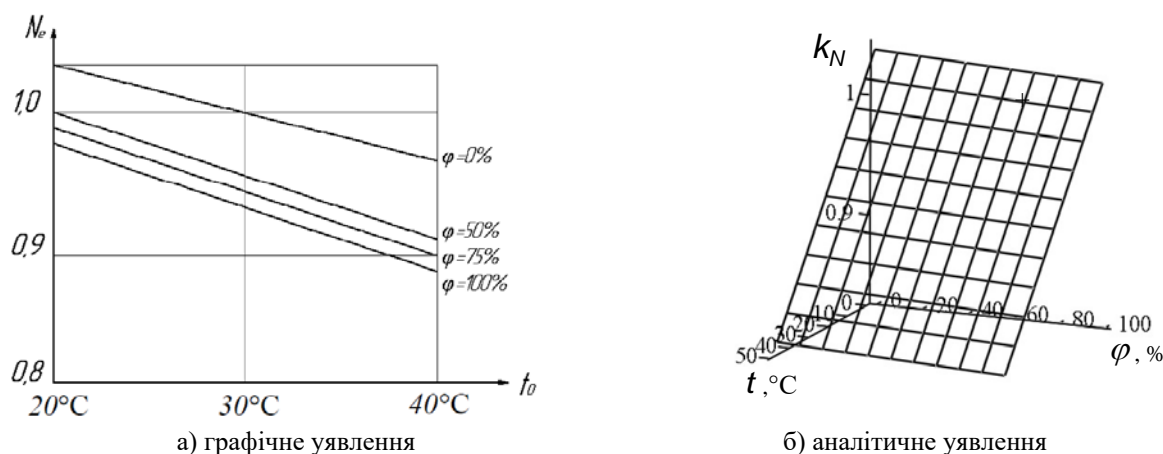


Рис. 4. Вплив параметрів навколишнього середовища на потужність суднової дизельної установки.

Задаючи певні значення температури та вологості з діапазону можливих змін параметрів навколишнього середовища в нормальних умовах експлуатації дизеля за допомогою рівняння (1) можна отримати поправочний коефіцієнт для урахування в процесі здійснення моделювання зміни потужності дизеля.

2. Залежність витрати палива від температури зовнішнього повітря.

Умови плавання не зберігаються незмінними протягом всього рейсу. Ця обставина може вплинути на реальні витрати палива. Наприклад [10], зміна барометричного тиску на ± 20 мм рт. ст. (0,026 МПа) призводить до зміни індикаторної потужності на $\pm 3-4\%$. Зміна температури зовнішнього повітря на ± 15 °C викликає зміну індикаторної потужності на $\pm 3-4\%$. Зміна відносної вологості повітря на $\pm 30\%$ при температурі повітря 25-40 ° C викликає зміну індикаторної потужності на $\pm 3-6\%$. З огляду на ці факти дизель в тропіках може втратити до 10-12% потужності.

В умовах експлуатації змінюються параметри атмосферного повітря: температура, вологість, атмосферний тиск. Вони мають сезонний характер і можуть змінюватися протягом доби [10]. З підвищенням температури зовнішнього повітря, відповідно і повітря в машинному відділенні (МВ) на вході наддувного турбокомпресора (ТК) суднового малообертового двигуна (МОД) його паливна ефективність погіршується Так, зі збільшенням на 10°C температури зовнішнього повітря на вході МОД питома витрата палива g_e зростає на 0,5 ... 0,7% [11]. Залежність питомої витрати умовного палива g_e від температури зовнішнього повітря t_n на вході МОД та потужності двигуна наведено на рис. 5, а.

Для урахування впливу температури зовнішнього повітря на витрати палива доцільно застосовувати регресійні моделі [12]. В результаті розрахунків отримано наступні вирази для кожного графіка на рис. 5, а, а саме:

- для $N_e = 0,75$

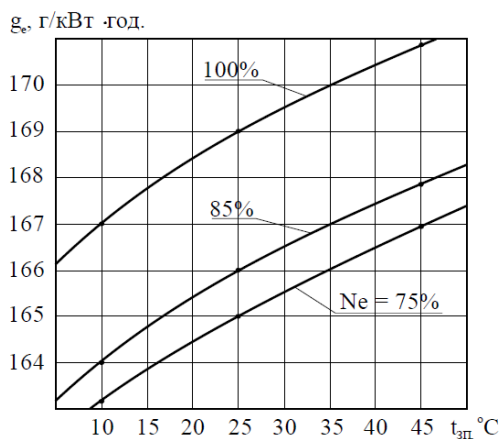
$$g_e = 161.8 + 0.140t_n - 0.000576t_n^2; \quad (2)$$

- для $N_e = 0,85$

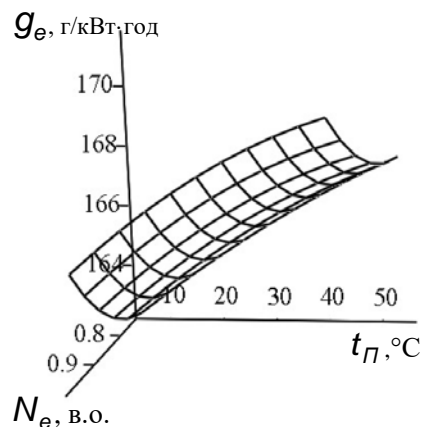
$$g_e = 162.5 + 0.163t_n - 0.000977t_n^2; \quad (3)$$

- для $N_e = 1,0$

$$g_e = 165.4 + 0.169t_n - 0.001053t_n^2. \quad (4)$$



а) графічне подання



б) аналітичне подання

Рис. 5. Залежність питомої витрати умовного палива МОД від температури зовнішнього повітря та потужності двигуна.

Якщо здійснити апроксимацію коефіцієнтів рівнянь (2)–(4), можна отримати наступне регресійне рівняння, яке дозволяє адекватно описати залежність питомої витрати умовного палива МОД від температури зовнішнього повітря та потужності, що розвиває дизель, у вигляді

$$g_e = b_0(N_e) + b_1(N_e)t_n + b_2(N_e)t_n^2, \quad (5)$$

де

$$b_0(N_e) = 188 - 71.9N_e + 49.3N_e^2;$$

$$b_1(N_e) = -0.517 + 1.446N_e - 0.76N_e^2;$$

$$b_2(N_e) = 0.011365 - 0.0264N_e + 0.01401N_e^2.$$

Поверхню отриманої залежності (5), яка апроксимує графіки, наведені на рис. 5,а у всьому робочому діапазоні зміни значень температури зовнішнього повітря та потужності двигуна, наведено на рис. 5,б.

Таку регресійну модель можна використати при проведенні імітаційного експерименту роботи СКЕЕТКУ при різних зовнішніх умовах для оцінювання обсягу витрат палива.

3. Імітаційні експерименти з комп'ютерною моделлю.

Вплив зовнішніх факторів на роботу дизеля досліджувався на прикладі двигуна типу 6 ЧН 15/18 [13]. Результати моделювання роботи дизеля із базовим варіантом звичайного турбокомпресора та із пропонуванім гібридним при короткочасному накиді навантаження на 20% наведені на рис. 6 та рис.7.

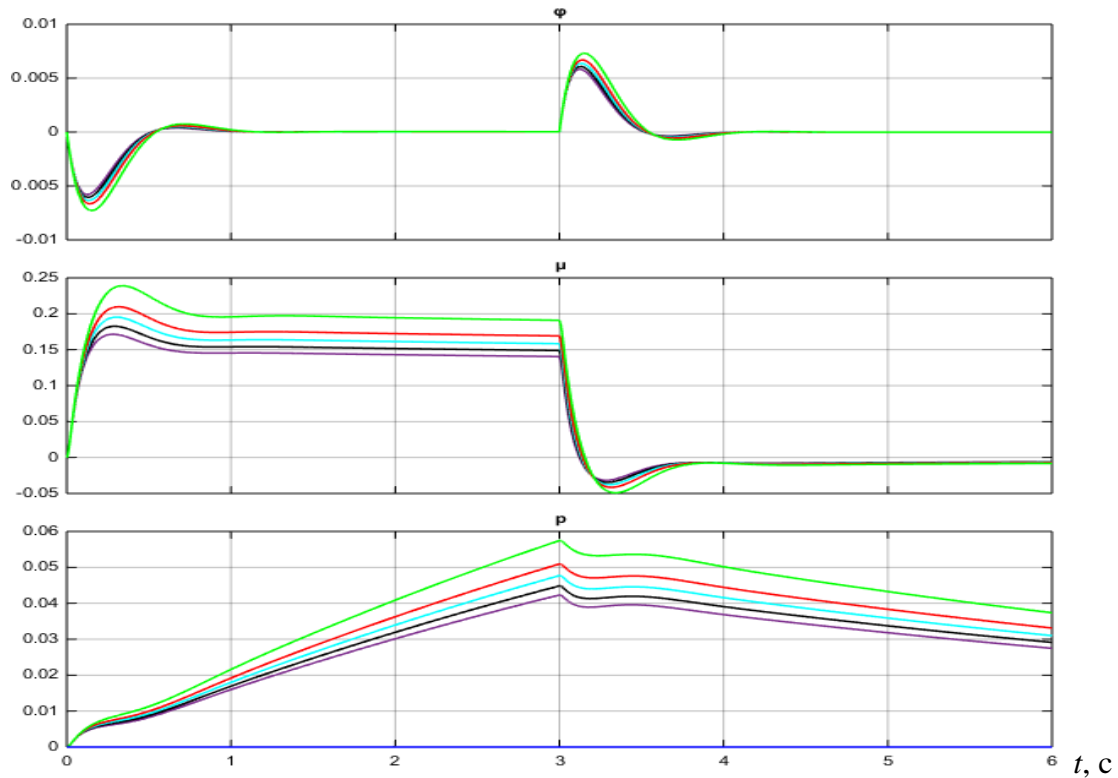


Рис. 6. Швидкість обертання валу φ , зміна положення паливної рейки μ та зміна тиску надувного повітря p дизеля із звичайним ТК при вологості 50% та різній температурі:
 — 5°C, — 20°C, — 35°C, — 50°C, — 75°C.

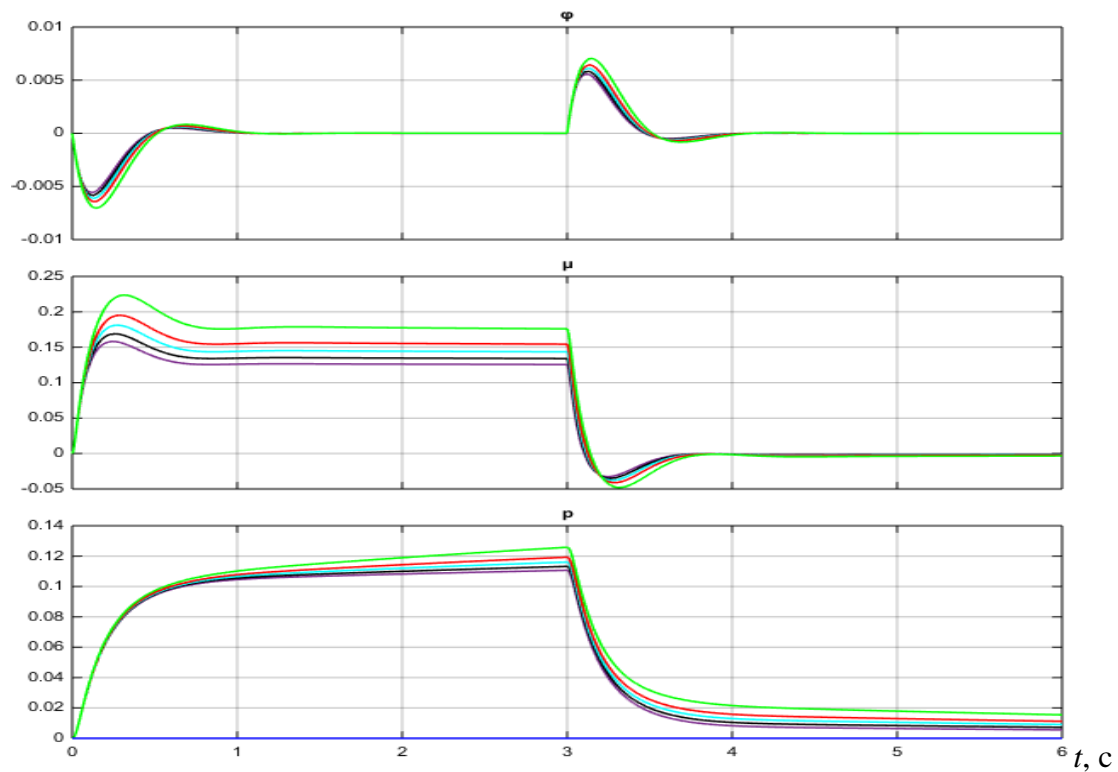


Рис. 7. Швидкість обертання валу φ , зміна положення паливної рейки μ та зміна тиску надувного повітря p дизеля із гібридним ТК при вологості 50% та різній температурі:
 — 5°C, — 20°C, — 35°C, — 50°C, — 75°C.

Для моделювання експлуатації дизеля в різних кліматичних умовах в комп'ютерній моделі (рис. 3,а) враховано зміну відносної потужності в залежності від температури та вологості зовнішнього повітря, шляхом введення коефіцієнту відносної потужності дизеля k_N згідно з виразом (1).

В табл. 1 для різних значень температури та вологості, окрім приросту споживання палива при короткочасному накиді навантаження, представлено відносну потужність дизеля k_N згідно (1) та відносну питому витрату умовного палива \bar{g}_e , що визначається як відношення витрати палива при певних експлуатаційних умовах до витрати в нормальних умовах.

Таблиця 1
Показники ефективності при різних експлуатаційних умовах

Відносна вологість повітря $\varphi_0, \%$	Температура повітря $t_{п0}, \text{ }^\circ\text{C}$	Відносна потужність дизеля k_N	Відносна питома витрата умовного палива \bar{g}_e	Приріст відносної витрати палива при накиді 20% навантаження		
				Звичайний ТК	Гібридний ТК	Зміна
50	5	1,060	0,983	0,0697	0,0627	0,007
	20	1,000	1,000	0,0739	0,0669	0,007
	35	0,940	1,017	0,0786	0,0716	0,007
	50	0,880	1,031	0,0840	0,0769	0,007
	75	0,780	1,050	0,0947	0,0877	0,007
70	5	1,058	0,982	0,0698	0,0628	0,007
	20	0,998	1,000	0,0740	0,0670	0,007
	35	0,938	1,017	0,0787	0,0717	0,007
	50	0,878	1,031	0,0841	0,0771	0,007
	75	0,778	1,050	0,0949	0,0879	0,007
90	5	1,057	0,982	0,0699	0,0629	0,007
	20	0,997	1,000	0,0741	0,0671	0,007
	35	0,937	1,016	0,0789	0,0718	0,007
	50	0,877	1,031	0,0843	0,0772	0,007
	75	0,777	1,050	0,0951	0,0881	0,007

Висновки

Підвищення ефективності суднових енергосистем можливе за рахунок впровадження новітніх систем відбору тепла відпрацьованих газів за умовою застосування належних систем керування. Проведення імітаційного експерименту підтверджує ефективність запропонованих конструктивних рішень.

Отримана модель СКЕЕТКУ дозволяє здійснювати моделювання процесів в системі при будь-яких перехідних режимах і зовнішніх умовах та проводити аналіз ефективності систем керування, побудованих за різними принципами.

Як видно з отриманих результатів, підвищення температури та вологості погіршують ефективність роботи дизеля та призводять до збільшення витрати палива, причому застосування додаткового наддуву дозволяє зменшити час перехідних режимів та, як наслідок, зменшити втрати палива у таких випадках. Подальше підвищення ефективності роботи системи наддуву можливе за рахунок зміни

параметрів налаштування контуру регулювання додаткового наддуву, тобто впровадження адаптивної системи керування.

Така адаптивна СКЕЕТКУ має змінювати параметри налаштування регулятора додаткового наддуву в залежності від збурюючих впливів, спираючись на певний критерій оптимальності. Таким чином, наступним етапом дослідження є формулювання такого критерію, з подальшими постановкою та розв'язанням задачі оптимального керування.

Список використаної літератури

1. Седаков Л. П., Баракан Г. Х., Калинина Л. И. Резервы повышения экономичности современных судовых дизельных энергетических установок. *Судостроение*. 1987. № 11. С. 20–25.
2. Рябенкий М. В., Короленко О. В., Вороненко С. В., Короленко Є. О. Головний двигун та суднова генераторна система в когенераційній установці судна. Електротехнічні та комп'ютерні мережі. 2017. №26(102). С.9-16.
3. Вороненко С. В., Субботін О. В., Лебеденко Ю. О., Рудакова Г. В. Моделювання суднової комплексної електроенергетичної турбокомпресорної установки в перехідних режимах. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2019. Т. 2. № 2. С. 13–22. DOI: 10.32782/2618-0340/2019.2-2.1.
4. Вороненко С. В., Іщенко І. М., Рудакова Г. В., Лебеденко Ю. А. Математична модель суднової комплексної електроенергетичної турбокомпресорної установки. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2019. № 2 (69). Частина 2. С. 31–38.
5. Shiraishi K., Ono Y., Sugishita K. Development of Large Marine Hybrid Turbocharger for Generating Electric Power with Exhaust Gas from the Main Engine. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2010. Vol. 47. № 3. P. 53–58.
6. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала». М.: СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.
7. Суворов П. С. Динамика дизеля в судовом пропульсивном комплексі. Одеса: ОНМА, 2004. 304 с.
8. ISO 3046-1:2002. Reciprocating internal combustion engines. Performance. Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods. Additional requirements for engines for general use. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200043283>.
9. Худяков И. В., Рудакова А. В., Клевцов Н. К. Моделирование влияния внешних условий при анализе динамики судна в ходовых режимах. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. №3 (62). Т. 2. С. 229–233.
10. Соболенко А. Н., Симашов Р. Р., Глазюк Д. К., Маницын В. В. Определение расхода топлива и моторного масла судовыми дизелями с учетом изменения внешних условий эксплуатации. *Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология*. 2017. № 3. С. 62–73.
11. Influence of Ambient Temperature Conditions. Main engine operation of MAN B&W two-stroke engines / MAN Diesel & Turbo. – Copenhagen, Denmark:MAN Diesel. 2010. 17 p. URL: <http://www.mandieselturbo.com>.MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-V-TII engines / Copenhagen, Denmark: MAN.
12. Киричков В. Н. Автоматика и управление в технических системах. В 11-ти кн. Кн. 2. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами. Под ред. А.А. Краснопрошиной. Київ: Вища шк. 1990. 263 с.
13. Марков В. А., Поздняков Е. Ф., Фурман В. В., Плахов С. В. Моделирование системы автоматического регулирования частоты вращения дизельного двигателя.

Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 7. С. 35–46. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-7-35-46.

References

1. Sedakov, L. P., Barakan, G.H., & Kalinina, L.I. (1987). Rezervyi povyisheniya ekonomichnosti sovremennyih sudovyih dizelnyih energeticheskikh ustanovok. *Sudostroenie*. **11**, 20–25.
2. Riabenkyi, M. V., Korolenko, O. V., Voronenko, S. V., & Korolenko Ye. O. (2017). Holovnyi dvyhun ta sudnova heneratorna systema v koheneratsiinii ustanovtsi sudna. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni merezhi*. **26**, 9-16.
3. Voronenko, S. V., Subbotin, O. V., Lebedenko, Yu. O., & Rudakova, H. V. (2019). Modeliuvannya sudnovoi kompleksnoi elektroenerhetychnoi turbokompresornoii ustanovky v perekhidnykh rezhymakh. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuvannya*. **2**, 2, 13–22. DOI: 10.32782/2618-0340/2019.2-2.1.
4. Voronenko, S. V., Ishchenko, I. M., Rudakova, H. V., & Lebedenko, Yu. A. (2019). Matematychna model sudnovoi kompleksnoi elektroenerhetychnoi turbokompresornoii ustanovky. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. **69**, 2, 31–38.
5. Shiraishi, K., Ono, Y., & Sugishita, K. (2010). Development of Large Marine Hybrid Turbocharger for Generating Electric Power with Exhaust Gas from the Main Engine. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. **47**, 3, 53-58.
6. Dyakonov, V. P. (2005). MATLAB 6.5 SP1/7 Simulink 5/6 v matematike i modelirovanii. Seriya «Biblioteka professionala». M.: SOLON-Press.
7. Suvorov, P. S. (2004). Dinamika dizelya v sudovom propulsivnom komplekse. Odessa: ONMA.
8. ISO 3046-1:2002. Reciprocating internal combustion engines. Performance. Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods. Additional requirements for engines for general use. Retrieved from: <http://docs.cntd.ru/document/1200043283>.
9. Hudyakov, I. V., Rudakova, A. V., & Klevtsov, N. K. (2017). Modelirovanie vliyaniya vneshnih usloviy pri analize dinamiki sudna v hodovyih rezhimakh. *Visnyk Hersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. **62**, 3(2), 229–233.
10. Sobolenko, A. N., Simashov, R. R., Glazyuk, D. K., & Manitsyin, V. V. (2017). Opredelenie rashoda topliva i motornogo masla sudovymi dizelyami s uchetom izmeneniya vneshnih usloviy ekspluatatsii. *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tehnologiya*. **3**, 62–73.
11. Influence of Ambient Temperature Conditions. (2010). Main engine operation of MAN B&W two-stroke engines / MAN Diesel & Turbo. – Copenhagen, Denmark:MAN Diesel. Retrieved from: <http://www.mandieselturbo.com>.MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines / Copenhagen, Denmark: MAN.
12. Kirichkov, V. N. (1990) Avtomatika i upravlenie v tehniceskikh sistemah. Identifikatsiya ob'ektov sistem upravleniya tehnologicheskimi protsessami. Kyiv: Vyscha shk.
13. Markov, V. A., Pozdnyakov, E. F., Furman, V. V., & Plahov, S .V. (2019). Modelirovanie sistemyi avtomaticheskogo regulirovaniya chastoty vrascheniya dizelnogo dvigatelya. *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Mashinostroenie*. **7**, 35–46. DOI: 10.18698/0536-1044-2019-7-35-46.

Вороненко Сергій Вікторович – викладач кафедри «Експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики» Херсонської державної морської академії, e-mail: vr.sergey@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3880-9556.

Субботін Олександр Володимирович – асистент кафедри «Експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики» Херсонської державної морської академії, e-mail: orion20121963@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1220-3695.

Лебеденко Юрій Олександрович – к.т.н., доцент, доцент кафедри «Автоматизації, робототехніки і мехатроніки» Херсонського національного технічного університету, e-mail: lebedenko@kntu.net.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240.

Рудакова Ганна Володимирівна – д.т.н., професор, професор кафедри «Автоматизації, робототехніки і мехатроніки» Херсонського національного технічного університету, e-mail: rudakovaanna25@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8053-4218.

УДК 004.056.55

А.В. ГАЛЬЧЕНКО, С.В. ЧОПОРОВ
Запорізький національний університет

КОДУВАННЯ ДАНИХ В АЛГОРИТМАХ ЗАПЕРЕЧУВАНОВОГО ШИФРУВАННЯ

Дане дослідження проведене авторами для перевірки гіпотези щодо можливості збільшення швидкості роботи алгоритмів заперечуваного шифрування, без внесення змін безпосередньо у вихідні алгоритми. Вказане дослідження є актуальним, оскільки алгоритми заперечуваного шифрування мають дієві схеми для захисту інформації та її користувачів. Однак структура вказаних алгоритмів складна та зосереджена, що досить сильно впливає на швидкість їх роботи та робить неможливим практичне застосування алгоритмів заперечуваного шифрування даних для вирішення завдань із захисту інформації. Основною метою дослідження є огляд алгоритмів кодування інформації, які дозволяють маніпулювати розміром даних шляхом зміни їх форми, але не інформаційної складової. Використання алгоритмів кодування в теорії повинне суттєво зменшити розмір даних, які обробляються алгоритмами заперечуваного шифрування. Вказаний підхід повинен забезпечити пропорційне зростання швидкодії алгоритмів заперечуваного шифрування та створити умови для їх практичного використання в подальшому. В цій роботі виконано огляд ефективних алгоритмів кодування даних і їх застосування в процедурах обробки інформації алгоритмів заперечуваного шифрування. Під час досліджень було розглянуто два алгоритми. Перший з них є базовою моделлю для блочного шифрування даних з використанням механізмів заперечуваного шифрування, недоліки безпеки в його роботі були виявлені та досліджені. Інший алгоритм побудований на основі імплементації ефективних алгоритмів кодування інформації в підсистему обробки даних базової моделі. Ефективність роботи обох алгоритмів була перевірена на реальних файлах з публічною та секретною інформацією. Дослідження проводилося на стендовому апаратному та програмному забезпеченні, яке імітує робоче місце користувача. Результати експериментів демонструють появу приросту в швидкості виконання вихідного алгоритму заперечуваного шифрування даних за рахунок зменшення розміру вхідних даних. Додатково було перевірено залежність отриманих результатів від ключів шифрування різного розміру. Отримані результати були порівняні з результатами досліджень інших авторів. Враховуючи результати експериментів гіпотеза авторів була підтверджена, оскільки кодування даних вхідних даних призвело до значного скорочення розміру вхідних даних та відповідного приросту швидкості їх виконання.

Ключові слова: заперечуване шифрування; захист інформації; конфіденційні дані; компресія даних; несанкціонований доступ; примушування; продуктивність; стиснення даних; шифр.

A.V. HALCHENKO, S.V. CHOPOROV
Zaporizhka National University

THE DATA ENCODING IN DENIABLE ENCRYPTION ALGORITHMS

The hypothesis of the deniable encryption algorithms productivity increasing without the original algorithms transformation possibility has been investigated in this article. The algorithms of deniable encryption is relevant because of effective protection schemes of information and its users. These algorithms have the complex and concentrated structure. It makes impossible their practical applying. Its productivity is affected by them. That's why

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.6

deniable encryption algorithms are not applied for practical using. The encoding information algorithms reviewing and its investigation are main objectives of the article. They allow to transform the information, not its value. The deniable encryption algorithms input data is reduced by the encoding algorithms. The deniable encryption algorithms proportional productivity increasing and their practical applying are provided. The effective encoding algorithms and their applications are overviewed and applied to deniable encryption algorithms in this manuscript. Two algorithms have been investigated. The first scheme is based on the deniable encryption mechanisms. Its security bugs have been identified and investigated. Another algorithm is based on the efficient encoding algorithms. They are implemented to the basic data processing subsystem. Both of the algorithms' efficiency has been investigated by the real public and secret information files using. The proposed data processing schemes are investigated by the user's workplace simulating. The original deniable encryption algorithm productivity increasing has been reached by the reduced data size. Also, the encryption keys difference and its dependence have been tested and compared with the other authors' investigations. Finally, the general authors' hypothesis has been confirmed. The tested deniable encryption algorithms productivity has been increased.

Keywords: denied encryption; information protection; confidential data; divide and rule method; unauthorized access; coercion; productivity; data compression; code....

A.B. ГАЛЬЧЕНКО, С.В. ЧОПОРОВ
Запорожский национальный университет

КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ В АЛГОРИТМАХ ОТРИЦАЕМОГО ШИФРОВАНИЯ

Данное исследование проведено авторами для проверки гипотезы о возможности увеличения скорости работы алгоритмов отрицаемого шифрования, без внесения изменений непосредственно в исходные алгоритмы. Указанное исследование является актуальным, поскольку алгоритмы отрицаемого шифрования имеют эффективные схемы для защиты информации, ее пользователей. Однако структура указанных алгоритмов сложная и сосредоточена, что достаточно сильно влияет на скорость их работы и делает невозможным практическое применение алгоритмов отрицаемого шифрования данных для решения задач по защите информации. Основной целью исследования является обзор алгоритмов кодирования информации, которые позволяют манипулировать размером данных путем изменения их формы, но не информационной составляющей. Использование алгоритмов кодирования в теории должно существенно уменьшить размер данных, которые обрабатываются алгоритмами отрицаемого шифрования. Указанный подход должен обеспечить пропорциональный рост быстродействия алгоритмов отрицаемого шифрования и создать условия для их практического использования в дальнейшем. В этой работе выполнен обзор эффективных алгоритмов кодирования данных и их применение в процедурах обработки информации алгоритмов отрицаемого шифрования. Во время исследований были рассмотрены два алгоритма. Первый из них является базовой моделью для блочного шифрования данных с использованием механизмов отрицаемого шифрования, недостатки безопасности в его работе были обнаружены и исследованы. Другой алгоритм построен на основе имплементации эффективных алгоритмов кодирования информации в подсистему обработки данных базовой модели. Эффективность работы обоих алгоритмов была проверена на реальных файлах с публичной и секретной информацией. Исследование проводилось на стендовом аппаратном и программном обеспечении, которое имитирует рабочее место пользователя. Результаты экспериментов показывают появление прироста в скорости выполнения исходного алгоритма отрицаемого шифрования данных за счет

уменьшения размера входных данных. Дополнительно исследована зависимость полученных результатов от ключей шифрования разного размера. Авторы сравнили полученные результаты с исследованиями других авторов. Учитывая результаты экспериментов гипотеза авторов была подтверждена, поскольку кодирование входных данных привело к значительному сокращению их размера и соответствующего прироста скорости шифрования.

Ключевые слова: отрицаемое шифрование; защита информации; конфиденциальные данные; компрессия данных; несанкционированный доступ; принуждение; производительность; сжатие данных; шифр.

Постановка проблеми

Авторами статті створена адаптивна модель шифрування даних, яка дозволяє застосовувати будь-які алгоритми заперечуваного шифрування для обробки файлів з даними [1]. На базі вказаної моделі створено декілька варіацій багатопоточних алгоритмів шифрування даних, які демонструють досить високі показники швидкодії, в порівнянні з подібними алгоритмами [2–3]. Разом з тим автори виявили можливість додаткового скорочення розміру даних, які обробляються алгоритмами заперечуваного шифрування та впливають на продуктивність їх роботи. Для зміни форми представлення даних автори пропонують використання алгоритмів кодування інформації [4] в підсистемах обробки даних алгоритмів шифрування. На їх домку вказаний підхід дозволить скоротити розмір вхідних даних і відповідно час необхідний для їх обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

З 80-х років та до тепер фахівці різних галузей займаються питаннями розробки, впровадження та дослідження механізмів заперечуваного шифрування. За вказаний час була розроблена та досліджена значна кількість алгоритмів заперечуваного шифрування. Однак в основі концепції заперечуваного шифрування лежить використання великої кількості важких обчислень, оптимізацією яких науковців займають по теперішній час. Ключові дослідження з питань розробки та дослідження алгоритмів заперечуваного шифрування, на які спираються автори в своєму дослідженні викладені в [5–8].

Іншим перспективним напрямком досліджень є розробка ефективних алгоритмів обробки даних і їх вдосконалення, зокрема дослідження алгоритмів кодування (стиснення даних). Результати вказаних досліджень придатні для використання в будь-якій галузі діяльності людини, оскільки обробка даних набула значного поширення.. Найбільш актуальні питання та напрями досліджень щодо кодування інформації викладені в роботах [9–12].

Мета дослідження

Основною метою дослідження є пошук оптимального алгоритму кодування даних і дослідження його впливу на процедури шифрування/дешифрування даних для його подальшого використання в алгоритмах заперечуваного шифрування. Вказаний підхід повинен скоротити розмір даних та підвищити швидкість виконання процедур шифрування/дешифрування даних в алгоритмах заперечуваного шифрування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Перед початком дослідження автори провели аналіз існуючих алгоритмів заперечуваного шифрування та інформацію стосовно продуктивності їх роботи [1]. За проведеного дослідження вторами було прийнято рішення та розроблена власна

ефективна модель алгоритму заперечуваного шифрування даних. Вихідний варіант запропонованого алгоритму передбачає використання окремих особливостей та конструкцій, які є типовими для існуючих симетричних алгоритмів шифрування. Особливістю вказаного рішення є те, що воно дозволяє реалізувати та використовувати будь-які механізми заперечуваного шифрування розроблені на теперішній час. Структурна схема вказаного алгоритму наведена на рис. 1:

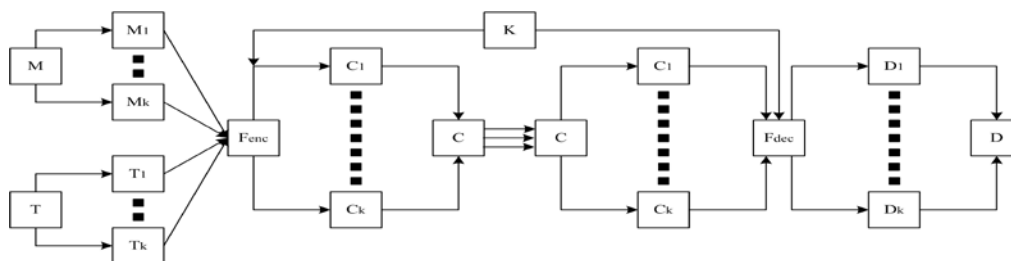


Рис. 1. Базова модель шифрування даних: $M, T, C, D, M_{1...k}, T_{1...k}, C_{1...k}, D_{1...k}$ – позначення вихідних, шифрованих, дешифрованих даних і їх наборів, $F_{enc}(\dots)$ та $F_{dec}(\dots)$ – процедури шифрування та дешифрування даних, K – ключ шифрування.

Метод використання механізмів заперечуваного шифрування зображений на рис. 1 демонструє досить високий рівень продуктивності в порівнянні з подібними алгоритмами [2–3]. Однак, отримані показники продуктивності недостатні для практичного використання алгоритму, в порівнянні з симетричними алгоритмами. Причиною вищевказаного є обмеження, які накладають схеми перетворення вказаних алгоритмів, та важкі обчислення, які лежать в їх основі.

Одним запропонованих авторами рішень є використання ефективних алгоритмів кодування даних. Вказане дозволить змінити форму даних і їх розмір, що є ключовим фактором для практичної реалізації алгоритмів заперечуваного шифрування.

Для використання запропонованого підходу автори розробили алгоритми імплементації ефективних алгоритмів кодування даних в підсистему обробки даних запропонованої авторами моделі (рис. 2):

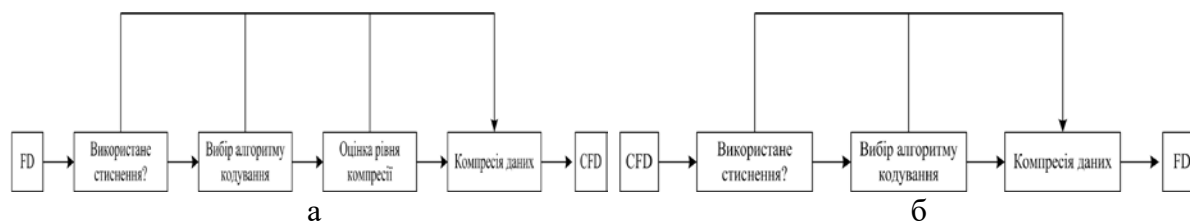


Рис. 2. Модифікація процедури обробки даних вихідного алгоритму заперечуваного шифрування: а – компресія даних; б – декомпресія даних.

Алгоритм обробки вхідних даних в процедурі шифрування (рис. 2а) включає наступний порядок дій:

- 1) Виконати попередню оцінку формату вхідного файлу з даними для визначення можливості використання алгоритмів кодування для їх зменшення [4].
- 2) Обрати ефективний алгоритм кодування даних, який відповідає типу зменшуваного файлу з даними, за класифікацією [4].
- 3) Знаючи розмір кодового слова після компресії даних L_{cp} та значення ентропії даних H , обчислити рівень стиснення файлу (1) [12]:

$$C_k = \frac{L_{cp} - H}{L_{cp}} \quad (1)$$

4) Виконати компресію файлу з даними за допомогою обраного алгоритму кодування інформації.

Алгоритм відновлення вхідних даних в процедурі дешифрування (рис. 2б) включає наступний порядок дій:

1) Виконати попередню перевірку файлу з даними на предмет застосування алгоритмів кодування.

2) Виконати декомпресію файлу з даними за допомогою відповідного алгоритму кодування.

Внаслідок імплементації перетворень вказаних на рис. 2 вихідна схема шифрування даних зазнала змін (рис. 3):

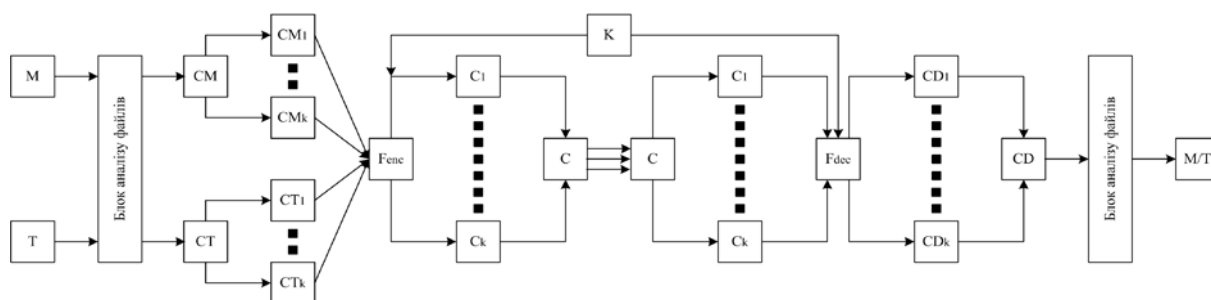


Рис. 3. Модифікована модель шифрування даних: $M, T, CM, CT, C, CD, M_{1..k}, T_{1..k}, CM_{1..k}, CT_{1..k}, C_{1..k}, CD_{1..k}$ – позначення вихідних, стиснутих, шифрованих, дешифрованих даних і їх наборів, $F_{enc}(\dots)$ та $F_{dec}(\dots)$ – процедури шифрування та дешифрування даних, K – ключ шифрування.

Вищевказані перетворення не змінюють базовий алгоритм, але їх використання, в теорії, повинне збільшити швидкість роботи моделі в C_k -разів.

Для проведення експериментів згідно вищевказаної схеми автори використали апаратне забезпечення – ЦП Intel(R) Core(TM) i5-8250, оперативна пам'ять DDR4 на 8 ГБ та жорсткий диск 500 ГБ; та програмне забезпечення – ОС Windows 10 та середовище програмування Python IDLE 3.7.3. Також автори внесли обмеження щодо тестових даних – розмір вхідних даних 1-20 МБ; формати тестових файлів JPG, EXE, PDF; розмір тестових ключів 1024 біт та 8192 біт. Вказані обмеження. За результатами проведених експериментів автори отримали оцінки часу роботи вихідного та модифікованого алгоритмів шифрування, які викладені в табл. 1 і 2, рис. 4.

Таблиця 1

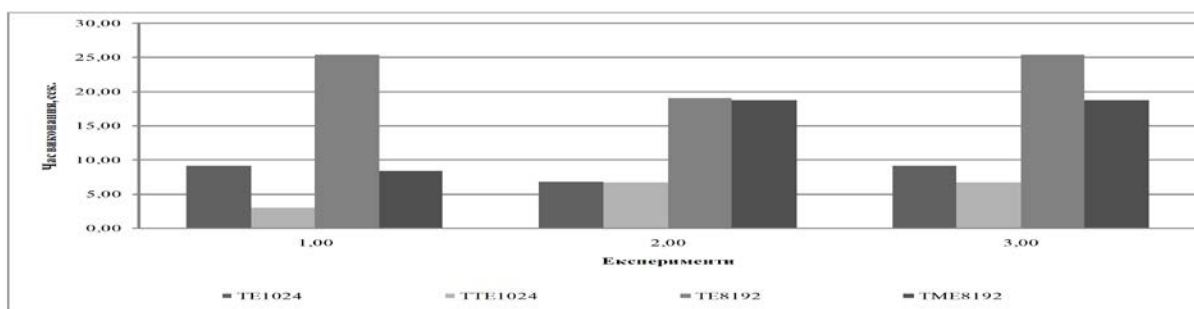
Результати експериментів з використанням вихідної схеми

I	Формат файлів	FS, байт	TE, с		TPD, с		TSD, с	
		KS, біт	1024	8192	1024	8192	1024	8192
1	JPG	528384	9,14	25,39	1508,73	30491,33	3737,66	75538,23
	EXE	20377600						
2	JPG	528384	6,87	19,08	1133,90	22916,04	2809,07	56771,44
	PDF	15314944						
3	EXE	20377600	9,14	25,39	1508,73	30491,33	3737,66	75538,23
	PDF	15314944						

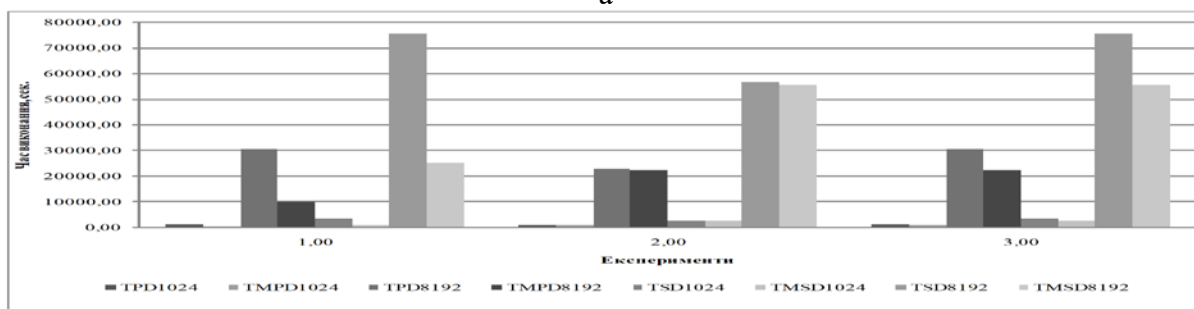
Таблиця 2

Результати експериментів з використанням модифікованої схеми

I	Формат файлів	FS, байт	TE, с		TPD, с		TSD, с	
		KS, біт	1024	8192	1024	8192	1024	8192
1	JPG	106496	3,05	8,47	503,41	10173,99	1247,14	25204,70
	EHE	6799360						
2	JPG	106496	6,74	18,72	1112,36	22480,86	2755,73	55693,34
	PDF	15024128						
3	EHE	6799360	6,74	18,72	1112,36	22480,86	2755,73	55693,34
	PDF	15024128						



а



б

Рис. 4. Оцінка часу виконання роботи вихідної і модифікованої моделей.

Результати проведених експериментів, які приведені на графіку (рис. 5) дозволяють зробити висновок, що запропонований авторами підхід призвів до незначного, але прискорення (до 3 разів прискорення алгоритмів заперечуваного шифрування). Разом з тим, вказані показники дозволили вказали авторам на необхідність повторного аналізу даних та отриманих результати, що дозволило виявити суттєву залежність коефіцієнту прискорення алгоритмів шифрування від різниці розмірів вхідних файлів. Саме тому для отримання максимальних показників прискорення в подальших дослідженнях автори рекомендують використовувати тестових дані з незначною різницею у розмірі. Також автори порівняли результати експериментів з подібними та встановили, що вказані результати хоч і не можуть порівнюватися з симетричними алгоритмами, але в порівнянні з подібними алгоритмами заперечуваного шифрування вони набагато перспективніші [2].

Висновки

В даній роботі виконано огляд основних напрямів дослідження та розробки алгоритмів заперечуваного шифрування та кодування (стиснення) даних. Авторами

запропонована ефективна модель шифрування даних, яка ґрунтується на використанні механізмів заперечуваного шифрування даних і їх стисненні за допомогою ефективних алгоритмів кодування. Основною метою роботи була перевірка гіпотези щодо можливості підвищення продуктивності алгоритмів заперечуваного шифрування шляхом зміни алгоритму кодування вхідних даних. Для перевірки цієї гіпотези автори провели серію експериментів, за результатами яких було отримано прискорення вихідної моделі шифрування в 1,5 – 3 рази в залежності від обраного алгоритму кодування та різниці між розмірами публічних і секретних даних. Таким чином, гіпотеза авторів була підтверджена. Результати цього дослідження можуть бути використані в дотичних дослідженнях щодо вивчення механізмів заперечуваного шифрування даних. Подальші дослідження автори планують проводити в напрямку реалізації вказаних моделей на основі багато поточних обчислень та розподілених систем, дослідження захищеності розроблених моделей.

Список використаної літератури

1. Гальченко А. В., Чопоров С. В. Заперечуване шифрування на основі застосування підходу гібридних криптографічних систем. *Радіoeлектроніка, інформатика, управління*. 2019. № 1. С. 178–191.
2. Молдовян Н. А., Вайчикаускас М. А. Расширение криптосхемы Рабина: алгоритм отрицаемого шифрования по открытому ключу. *Вопросы защиты информации*. 2014. № 2. С. 12–16.
3. Молдовян Н. А., Биричевский А. Р., Мондикова Я. А. Отрицаемое шифрование на основе блочных шифров. *Информационно-управляющие системы*. 2014. № 5. С. 80–86.
4. Буза М. К. Механизм повышения надежности сжатия данных. *Искусственный интеллект*. 2016. № 2. С. 96–102.
5. Goldwasser S., Micali C. Probabilistic Encryption. *Journal of Computer and System Sciences*. 1984. Vol. 28. P. 277–299.
6. Canetti R., Dwork C., Naor M., Ostrovsky R. Deniable Encryption. *Advances in Cryptology – CRYPTO: 30th Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques*. (Estonia, Tallinn, May 15-19, 2011). Berlin: Springer, 1997. P. 90–104.
7. Ibrahim H. Receiver-Deniable Public-Key Encryption. *International Journal of Network Security*. 2009. Vol. 8. № 2. P. 159–165.
8. Klonowski M., Kubiak P., Kutylowski M. Practical Deniable Encryption. *SOFSEM 2008: 34th Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science*. (Slovakia, Nový Smokovec, January 19-25, 2008). Berlin: Springer, 2008. P. 599–609.
9. Лидовский В. В. Теория информации: М.: Компания Спутник+, 2004. 111 с.
10. Grasmann U., Miikkulainen R. Effective Image Compression Using Evolved Wavelets. *Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2005: International Conference*. (USA, Washington, June 25-29, 2005). New York: Association for Computing Machinery, 2005. P. 1961–1968.
11. Zhihua G., Xiuli C., Zhang J., Zhang Y. An Effective Image Compression–Encryption Scheme Based on Compressive Sensing (CS) and Game of Life (GOL). *Neural Computing and Applications*. 2020. Vol. 32. Issue 17. P. 4961–4988.
12. Kedarnath J. B., Nur A. T. Relationship Between Entropy and Test Data Compression. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 2007. Vol. 26. №. 2. P. 386–395.

References

1. Halchenko, A. V., & Choporov, S. V. (2019). Zaperechuvane shyfruvannia na osnovi zastosuvannia pidkhodu hibrydnykh kryptografichnykh system. *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*. **1**, 178–191.
2. Moldovyan, N. A., & Vaychikauskas, M. A. (2014). Rasshirenje kriptoshemyi Rabina: algoritm otritsaemogo shifrovaniya po otkrytomu klyuchu. *Voprosyi zaschityi informatsii*. **2**, 12–16.
3. Moldovyan, N. A., Birichevskiy, A. R., & Mondikova, Ya. A. (2014). Otritsaemoe shifrovanie na osnove blochnyih shifrov. *Informatsionno-upravlyayuschie sistemyi*. **5**, 80–86.
4. Buza, M. K. (2016). Mehanizm povyisheniya nadezhnosti szhatiya dannyih. *Shtuchniy Intelekt*. **2**, 96–102.
5. Goldwasser, S., & Micali, C. (1984). Probabilistic Encryption. *Journal of Computer and System Sciences*. **28**, 277–299.
6. Canetti, R., Dwork, C., Naor, M. & Ostrovsky, R. (1997). Deniable Encryption. *Advances in Cryptology – CRYPTO: 30th Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques*. (Estonia, Tallinn, May 15-19, 2011). Berlin: Springer, pp. 90–104.
7. Ibrahim, H. (2009). Receiver-Deniable Public-Key Encryption. *International Journal of Network Security*. **8**, 2, 159–165.
8. Klonowski M., Kubiak P., Kutylowski M. (2008). Practical Deniable Encryption. SOFSEM 2008: 34th Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science. (Slovakia, Nový Smokovec, January 19-25, 2008). Berlin: Springer, pp. 599–609.
9. Lidovskiy, V. V. (2004). Teoriya informatsii: Uchebnoe posobie. M.: Kompaniya Sputnik.
10. Grasmann, U., & Miikkulainen, R. (2005). Effective Image Compression Using Evolved Wavelets. *Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2005: International Conference*. (USA, Washington, June 25-29, 2005). New York: Association for Computing Machinery, pp. 1961–1968.
11. Zhihua, G., Xiuli, C., Zhang, J., & Zhang, Y. (2020). An Effective Image Compression–Encryption Scheme Based on Compressive Sensing (CS) and Game of Life (GOL). *Neural Computing and Applications*. **32**, 17, 4961–4988.
12. Kedarnath J. B., & Nur A. T. Relationship Between Entropy and Test Data Compression. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. **26**, 2, 386–395.

Гальченко Андрій Віталійович – аспірант кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету, email: andream1993@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2258-9755.

Чопоров Сергій Вікторович – к.т.н., доцент, старший викладач кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету, e-mail: s.choporoff@znu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5932-952X.

УДК 004.942

В.Ф. МИРГОРОД, И.М. ГВОЗДЕВА,
В.В. ЛЕЩЕНКО, А.П. ТУМОЛЬСКИЙ, А.Г. КАЛУЕВ
Национальный университет «Одесская морская академия»

ПРОБЛЕМЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРНОГО ТИПА

Предлагается подход к получению математического описания динамики безмультипликаторной турбогенераторной ветроэнергетической установки в безразмерном нормированном виде, а также оценка располагаемых запасов аэродинамической устойчивости для различных ветровых условий на основе предлагаемой математической модели. Подход основан на первоначальном формировании уравнений динамики вращательного движения винтовых групп с использованием законов сохранения и равновесия с учетом аэродинамических характеристик ветроколеса и турбомашин. В последующем на основе метода эквивалентных преобразований математических моделей получены уравнения динамики ветроэнергетической установки в нормированном виде относительно быстроходностей ветроколеса и каждой из турбомашин. Уравнения динамики ветроэнергетической установки в нормированном виде представляют собой систему нелинейных параметрических дифференциальных уравнений, параметры которых зависят как от конструктивных особенностей установки, так и от параметров ветрового потока. Предлагаемые уравнения динамики ветроэнергетической установки в нормированном виде имеют симметричный вид и могут быть использованы на этапе проектирования для различных схем построения. Наиболее важным результатом исследования является установленная зависимость параметров нелинейных уравнений динамики ветроэнергетической установки от градиента скорости ветра. Методом компьютерного моделирования выполнено исследование зависимости запасов аэродинамической устойчивости от скорости ветрового потока и градиента этой скорости. Установлено, что при наличии положительного градиента скорости ветрового потока запасы аэродинамической устойчивости ветроэнергетической установки при постоянной нагрузке снижаются. Положительный градиент скорости ветрового потока может быть вызван, например, порывами ветра либо сдвигом ветра. Эффект уменьшения запасов аэродинамической устойчивости ветроэнергетической установки является более значительным при меньших скоростях ветрового потока. Предлагаемые уравнения динамики ветроэнергетической установки в нормированном виде могут быть использованы для решения широкого круга задач проектирования и исследования динамических режимов ветроэнергетических установок для условий переменного ветрового потока.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка; математическая модель; устойчивость; метод эквивалентных преобразований.

В.Ф. МИРГОРОД, І.М. ГВОЗДЕВА,
В.В. ЛЕЩЕНКО, А.П. ТУМОЛЬСКИЙ, А.Г. КАЛУЄВ
Національний університет «Одеська морська академія»

ПРОБЛЕМИ АЕРОДИНАМІЧНОЇ СТАЛОСТІ І МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРНОГО ТИПУ

Пропонується підхід до отримання математичного опису динаміки безмультіплікаторної турбогенераторної вітроенергетичної установки в безрозмірному нормованому вигляді, а також оцінка наявних запасів аеродинамічної стійкості для різних вітрових умов на основі запропонованої математичної моделі. Підхід визначається за заданим формуванні рівнянь динаміки обертального руху гвинтових груп з використанням законів збереження і рівноваги з урахуванням аеродинамічних характеристик вітроколеса і турбомашин. В подальшому на основі методу еквівалентних перетворень математичних моделей отримані рівняння динаміки вітроенергетичної установки в нормованому вигляді щодо швидкохідностей вітроколеса і кожної з турбомашин. Рівняння динаміки вітроенергетичної установки в нормованому вигляді представляють собою систему нелінійних параметричних диференціальних рівнянь, параметри яких залежать як від конструктивних особливостей установки, так і від параметрів вітрового потоку. Пропоновані рівняння динаміки вітроенергетичної установки в нормованому вигляді мають симетричний вид і можуть бути використані на етапі проектування для різних схем побудови. Найбільш важливим результатом дослідження є встановлена залежність параметрів нелінійних рівнянь динаміки вітроенергетичної установки від градієнта швидкості вітру. Методом комп'ютерного моделювання виконано дослідження залежності запасів аеродинамічної сталості від швидкості вітрового потоку і градієнта цієї швидкості. Встановлено, що при наявності позитивного градієнта швидкості вітрового потоку запаси аеродинамічної сталості вітроенергетичної установки при постійному навантаженні знижуються. Позитивний градієнт швидкості вітрового потоку може бути викликаний, наприклад, поривами вітру або зсувом вітру. Ефект зменшення запасів аеродинамічної сталості вітроенергетичної установки є більш значним при менших швидкостях вітрового потоку. Пропоновані рівняння динаміки вітроенергетичної установки в нормованому вигляді можуть бути використані для вирішення широкого кола завдань проектування і дослідження динамічних режимів вітроенергетичних установок для умов змінного вітрового потоку.

Ключові слова: вітроенергетична установка; математична модель; сталість; метод еквівалентних перетворень.

V. MYRHOROD, I. HVOZDEVA,
V. LESHCHENKO, A. TUMOLSKYI, A. KALUEV
National University 'Odessa Maritime Academy'

PROBLEMS OF AERODYNAMIC STABILITY AND A MATHEMATICAL MODEL OF A WIND POWER PLANT OF TURBOGENERATOR TYPE

An approach to obtaining a mathematical description of the dynamics of a multiplier turbine generator of wind power plant in a dimensionless normalized form is proposed, as well as an estimation of the available aerodynamic stability reserves for various wind conditions based on the proposed mathematical model. The approach is based on the initial

formation of the equations for the rotational motion dynamics of the screw groups using the laws of conservation and equilibrium, taking into account the aerodynamic characteristics of the wind wheel and turbomachines. On the basis of the method of equivalent transformations of mathematical models, the equations of a wind power plant dynamics were obtained in a normalized form with respect to the speed of the wind wheel and each of the turbomachines. The equations of dynamics of a wind power plant in normalized form are a system of nonlinear parametric differential equations, the parameters of which depend both on the design features of the wind power plant and on the parameters of the wind flow. The proposed equations of the wind power plant dynamics in normalized form have a symmetrical form and can be used at the design stage for various construction schemes. The most important result of the study is the established dependence of the nonlinear equations parameters of the wind power plant dynamics on the gradient of wind speed. The study of the dependence of aerodynamic stability reserves on the speed of the wind flow and the gradient of this speed has been carried out by the method of computer simulation. It was found that in the presence of a positive gradient of the wind flow velocity, the aerodynamic stability reserves of a wind power plant at a constant load are reduced. A positive gradient in wind speed can be caused, for example, by wind gusts or by wind shear. The effect of reducing the aerodynamic stability reserves of a wind power plant is more significant at lower wind flow velocities. The proposed equations of the wind power plant dynamics in a normalized form can be used to solve a wide range of design problems and study the dynamic modes of wind power plants for conditions of variable wind flow.

Keywords: wind power plant; mathematical model; stability; method of equivalent transformations.

Постановка проблемы

Развитие ветроэнергетики является в настоящее время общемировым трендом ввиду наличия известных экологических и экономических проблем использования ископаемых ресурсов. Ветроэнергетические установки (ВЭУ) являются совершенными и сложными объектами. Большинство ВЭУ имеют классическую схему с ветроколесом большого диаметра и электромеханической системой преобразования энергии ветрового потока. Недостатки классической схемы ВЭУ известны: низкие обороты ветроколеса, зависимость от скорости ветрового потока, сложность преобразования энергии ветрового потока. Указанных недостатков лишена безмультипликаторная турбогенераторная схема ВЭУ большой мощности отечественной разработки: Такая ВЭУ имеет на ветроколесе турбомашину с собственными винтовыми группами. Плоскости винтов турбомашин развернуты в направлении набегающего воздушного потока. Скорость этого потока является векторной суммой скорости ветра и линейной скорости потока, возникающего вследствие вращательного движения ветроколеса. Высокие значения и стабильность ветрового напора на винты турбомашин при изменении скорости ветра позволяют существенно снизить сложность электромеханической части ВЭУ и использовать электрогенераторы, допускающие непосредственное включение в промышленную сеть. Сложность процессов в ВЭУ указанного типа, содержащей две последовательных ступени аэродинамического преобразования энергии, обуславливает необходимость разработки соответствующего математического описания таких процессов и исследования проблем устойчивости в условиях переменного ветра.

Анализ последних исследований и публикаций

Математическое описание установившихся режимов безмультипликаторной турбогенераторной ВЭУ представлены в [1]. Математические модели (ММ) динамики ВЭУ, разработанные на основе известных соотношений [1–5], предложены в [2]. Там же приведена компьютерная реализация предложенных моделей.

Математическое описание динамических режимов безмультипликаторной турбогенераторной ВЭУ основано на законах сохранения и равновесия моментов, зависящих от угловых скоростей ветроколеса и винтовых групп турбомашин. Предложенные ММ позволяют оценить динамические перегрузочные моменты при запуске ВЭУ, изменении скорости ветра, изменении нагрузки и в других переходных режимах. Однако основные характеристики винтовых групп (винтов турбомашин и ветроколеса) являются безразмерными зависимостями от быстроходности: отношения линейной скорости вращательного движения к скорости собственного воздушного потока.

Получение математического описания динамики ВЭУ в безразмерном нормированном виде относительно быстроходности необходимо для сравнительного анализа различных конструктивных решений и оценки располагаемых запасов устойчивости при переменном ветре. Такое преобразование выполнено авторами в [6], однако анализ проблем устойчивости ВЭУ и численная оценка запасов устойчивости еще не нашли достаточного освещения.

Цель исследования

Целью работы является уточнение математического описания динамики ВЭУ в безразмерном нормированном виде относительно быстроходности, а также оценка располагаемых запасов аэродинамической устойчивости для различных ветровых условий.

Изложение основного материала исследований

В соответствии с [2] уравнения динамики ВЭУ турбогенераторного типа в виде уравнений равновесия моментов имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [C_{n1}(\omega_1 R_1 / V_0, \delta)] \times \\ \times R_1^2 V_0^3 / \omega_1 - \frac{3\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [C_{t2}(\omega_2 R_{20} / V_2)] \times \\ \times R_{20}^2 R_2 V_2^2 \cos \alpha - M_{c1}(\omega_1, T_H), \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [C_{n2}(\omega_2 R_{20} / V_2)] \times \\ \times R_{20}^2 V_2^3 / \omega_2 - M_H(S, I) - M_{c2}(\omega_2, T_H), \end{array} \right. \quad (1)$$

где R_1 – радиус ветроколеса (ВК), R_{20} – радиус винтов турбомашин, R_2 – радиус точки установки турбомашин, $\rho(T_H, P_H)$ – плотность воздуха, зависящая от температуры T_H и давления P_H , V_0 – средняя скорость ветрового потока, V_2 – скорость потока на винтах турбомашин, α – угол установки турбомашин, J_1 – момент инерции ветроколеса, z_1 – быстроходность ветроколеса, $z_1 = \omega_1 R_1 / V_0$, z_2 – быстроходность винтов турбомашин, $z_2 = \omega_2 R_{20} / V_2$, $C_{n1}(z_1, \delta)$ – семейство расчетных характеристик коэффициента

мощности ветроколеса, $C_{n2}(z_2)$ – расчетная характеристика коэффициента мощности винтов турбомашин; $C_{t2}(z_2)$ – расчетная характеристика коэффициента осевой силы винтов турбомашин; M_H – нагрузочный, например, генераторный момент, зависящий от тока нагрузки I , M_{C1} – момент сопротивления, δ – угол поворота лопастей ветроколеса.

$$\left. \begin{aligned} V_2 &= \sqrt{V_0^2 + V_r^2} \cos(\alpha - \beta), \\ V_r &= \omega_1 R_2, \beta = \arctg(V_0 / V_r) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

По сравнению с [2] динамика ВЭУ описывается системой уравнений (1), в которой в явном виде учитываются характеристики быстроходности. Второе уравнение в (1) описывает динамику одной из турбомашин. Если имеет место неидентичность характеристик турбомашин, то необходимо дополнить систему (1) соответствующими уравнениями каждой из турбомашин. На рис. 1 представлены качественные характеристики быстроходности ветроколеса в зависимости от угла поворота лопастей и нагрузочная характеристика, на рис. 2 – характеристики быстроходности винтов турбомашин.

В соответствии с поставленной целью исследования переход от дифференциальных уравнений в форме (1) для угловых скоростей вращательного движения ветроколеса и турбомашин к дифференциальным уравнениям, в которых искомыми функциями являются изменения параметров быстроходности, выполняется на основе следующих соотношений:

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= z_1 V_0 / R_1, \quad \omega_2 = z_2 V_2 / R_{20}, \\ V_2 &= \sqrt{V_r^2 + V_0^2} \cdot \cos\left(\arctg \frac{V_0}{V_r} - \alpha\right). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

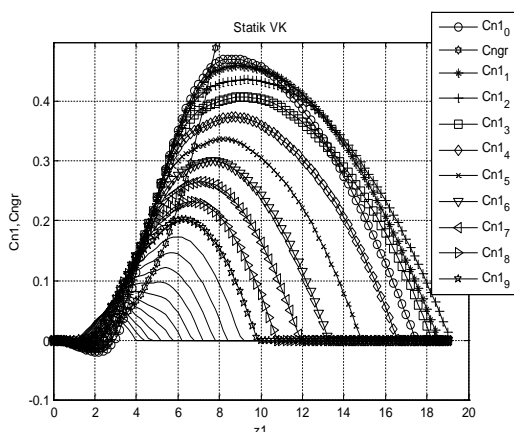


Рис. 1. Характеристики быстроходности ветроколеса.

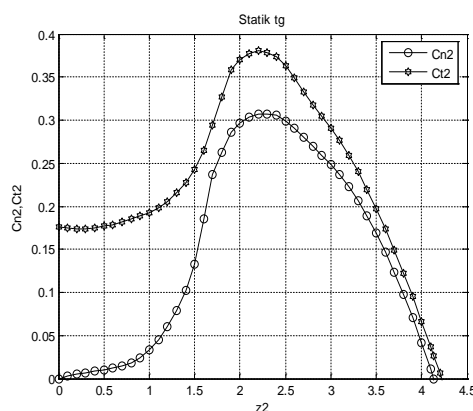


Рис. 2. Характеристики быстроходности винтов турбомашин.

Подстановка (3) в (1) после некоторых преобразований дает возможность получить безразмерные уравнения динамики ВЭУ турбогенераторного типа в нормированном виде. Далее полагается, что угол поворота лопастей ветроколеса является неизменным, а характеристики турбомашин идентичны. По сравнению с [6] математическое описание динамики в нормированном виде имеет ряд уточнений.

$$\begin{cases} a \left(\frac{1}{V_0} \frac{dz_1}{dt} + \frac{1}{V_0^2} z_1 \frac{dV_0}{dt} \right) z_1 = C_{n1}(z_1) - 3bf^2(z_1)C_{t2}(z_2)z_1, \\ d \left(\frac{1}{V_2} \frac{dz_2}{dt} + \frac{1}{V_2^2} z_2 \frac{dV_2}{dt} \right) z_2 = 3C_{n2}(z_2) - N_H/P_{ig}, \end{cases} \quad (4)$$

где $a = 2J_1/\pi\rho R_1^4$, $b = R_{20}^2 R_2/R_1^3$, $f(z_1) = \sqrt{c^2 z_1^2 + 1} \cos(\text{arctg}(cz_1) - \alpha)$,
 $P_{ig} = (\pi\rho/2) R_{20}^2 V_2^3$, $c = R_2/R_1$, $d = 2J_2/(\pi\rho R_{20}^4)$.

Представленные уравнения динамики ВЭУ имеют весьма примечательный вид. Обращает внимание их симметричность и одинаковость формы зависимостей левых частей. Правая часть уравнений (4) при приравнивании ее к нулю образует нормированные уравнения статики ВЭУ. Уравнения динамики ВЭУ в предлагаемой форме позволяют выполнить сравнение различных конструктивных решений, а также исследовать переходные режимы при переменном ветре. Явная зависимость параметров уравнений (4) от скорости и градиента скорости ветра указывает на возможность потери аэродинамической устойчивости при наличии градиента скорости ветра (порывы и сдвиг ветра). На рис. 3 представлено изменение положения рабочей точки на характеристике быстроходности ветроколеса при градиенте скорости ветра. Рис. 4 иллюстрирует зависимость запасов аэродинамической устойчивости от градиента скорости ветра. Запасы аэродинамической устойчивости определены в соответствии с [6].

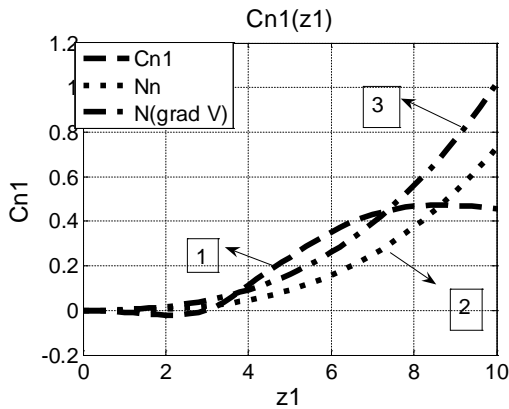


Рис. 3. Изменение положения рабочей точки на характеристике быстроходности ветроколеса при градиенте скорости ветра:
 1 – характеристика быстроходности,
 2 – номинальная нагрузочная характеристика, 3 – нагрузочная характеристика при наличии градиента скорости ветра 0,1 м/с².

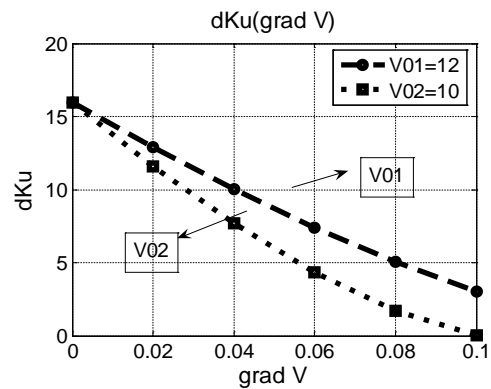


Рис. 4. Зависимость запасов аэродинамической устойчивости от градиента скорости ветра.

Потеря аэродинамической устойчивости означает уход рабочей точки на левую ветку характеристики быстроходности [6]. Наиболее опасным является автономный режим работы ВЭУ (по сравнению с режимом работы параллельно с сетью) при переменной нагрузке и существенной изменчивости ветра.

Выводы

Математическое описание динамики безмультипликаторной турбогенераторной ВЭУ в безразмерном нормированном виде относительно быстроходности позволяет выполнить предварительную оценку эффективности предлагаемых проектных решений, а также оценку располагаемых запасов аэродинамической устойчивости для различных ветровых условий и режимов работы. Установлен эффект снижения запасов аэродинамической устойчивости ВЭУ при наличии градиента скорости ветра.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в исследовании влияния турбулизации ветрового потока.

Список использованной литературы

1. Голубенко Н. С. Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэлектрической установки большой мощности. *Нетрадиционная энергетика в XXI веке: материалы IV международной конференции*. (Гурзуф, 29 сентября–3 октября 2003 г.). С. 125–132.
2. Миргород В. Ф., Ранченко Г. С., Голубенко Н. С. Моделирование динамических режимов ветроэнергетической установки большой мощности. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2006. № 4(30). С. 96–99.
3. Твайдел Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 392 с.
4. Шефтер Я. И., Использование энергии ветра. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 200 с.
5. Johnson G. Wind Energy System. N.Y: Prentice Hall, 1985. 421 p.
6. Гвоздева И. М., Миргород В. Ф., Деренг Е. В., Полищук П. И., Глазева О. В. Преобразование математической модели динамики ветроэнергетической установки к нормированной форме. *Електромеханічні і енергозберегаючі системи*. 2012. № 3(19). С. 456–458.

References

1. Golubenko, N. S. (2003). Aerodinamicheskie osobennosti bezmultiplikatornoy turbogeneratornoy shemyi vetroelektricheskoy ustanovki bolshoy moschnosti. Proceedings of the *Netraditsionnaya energetika v XXI veke: materialyi IV mezhdunarodnoy konferentsii*. (Gurzuf, September 29–October 3, 2009), pp. 125–132.
2. Mirgorod, V. F., Ranchenko, G. S., & Golubenko, N. S. (2006). Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov vetroenergeticheskoy ustanovki bolshoy moschnosti. *Aviatsiyno-kosmichna tehnika i tehnologia*. **30**, 4, 96–99.
3. Tvaydel, Dzh., & Ueyr, A. (1990). *Vozobnovlyaemye istochniki energii*. Moskva: Energoatomizdat.
4. Shefter, Ya. I. (1983). *Ispolzovanie energii vetra*. Moskva: Energoatomizdat.
5. Johnson, G. (1985). *Wind Energy System*. N.Y: Prentice Hall.
6. Gvozdeva, I. M., Mirgorod, V. F., Dereng, E. V., Polischuk, P. I., & Glazeva, O. V. (2012). Preobrazovanie matematicheskoy modeli dinamiki vetroenergeticheskoy ustanovki k normirovanoy forme. *Elektromehanichni I energozberegayuchi sistemi*. **19**, 3, 456–458.

Миргород Владимир Федорович – д.т.н., доцент, профессор кафедры автоматизации судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: v.f.mirgorod@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8361-1672.

Гвоздева Ирина Маратовна – д.т.н., профессор, профессор кафедры электрооборудования и автоматики судов Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: oporchenko.im@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5797-0559.

Лещенко Валерий Владиславович – старший преподаватель кафедры электрооборудования и автоматики судов Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: lvvlvv@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0219-5174.

Тумольский Александр Петрович – старший преподаватель кафедры электрооборудования и автоматики судов Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: nikola7074@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3017-3781.

Калуев Анатолий Григорьевич – к.т.н., доцент кафедры электрической инженерии и электроники Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: kaluevanatoliy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4469-4054.

УДК 004.08

В.В. ГРИЦИК

Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ УНІФІКАЦІЇ СТАНДАРТНИХ ПОРОГОВИХ МЕТОДІВ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ.

У роботі представлено дослідження автора у напрямку огляду ефективних методів сегментації, що пов'язаних які можна використати в навчальному процесі сьогодення. У роботі проаналізовано базові рішення та їх математичне обґрунтування. Показано основні обмеження застосування та проблемні області застосування. У роботі описано основні принципи порогового визначення. Порогові методи є одними з найпростіших в реалізації та найбільш широко застосовуваних методів сегментації зображень. Мета порогового значення – розподілити зображення на регіони із заданими характеристиками та видалити всі інші регіони які визнано несуттєвими. Матеріал, представлений в цій роботі дає базове розуміння різних стратегій вибору порогових значень. Головною метою цієї роботи є дослідження методів порогової сегментації зображень для побудови математичної моделі швидкої обробки даних при розпізнавання зображень. Оцінюючи приналежність пікселя до сегменту комп'ютер потребує алгоритму вибору оптимального методу сегментації. Для вибору адаптації рішення до конкретного зовнішнього стану потрібно знайти алгоритм, що забезпечить найкраще розпізнавання. У статті досліджено методи сегментації, які здійснюються насамперед з метою зменшення надмірності інформації для конкретних часових умов, залишаючи в ньому лише інформацію, необхідну для вирішення конкретної задачі в конкретний момент часу. У бінарному зображенні цікаві для нас частини (наприклад, контури відображуваних об'єктів) повинні бути збережені, а незначні риси (фон) виключені. Основна ідея роботи є основою для навчання математики в системі сприйняття образів. Зокрема, комп'ютер повинен відчувати і розуміти динаміку реального світу. Тому автор досліджує моделі та засоби синтезу методів сприйняття даних зорового спектру, що знаходяться у режимі реального часу.

Ключові слова: розпізнавання зображень; сегментація зображень; комп'ютерний зір.

В.В. ГРИЦИК

Национальный университет «Львовская политехника»

ИССЛЕДОВАНИЕ УНИФИКАЦИИ СТАНДАРТНЫХ ПОРОГОВЫХ МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлено исследование автора в направлении анализа эффективных методов сегментации, которые можно использовать в преподавательском процессе при рассмотрении современных задач. В работе рассмотрено базовые решения и их математическое обоснование. Показано основные ограничения использования и предметные области. Пороговые методы являются одними из самых простых в реализации и, одновременно, наиболее распространёнными. Целью порогового подхода является разделение изображения на регионы с определёнными характеристиками с одновременным удалением регионов без этих характеристик. Материал рассмотренный в этой работе даёт базовое понимание разных стратегий выбора пороговых значений.

Материал, представленный в этой работе дает базовое понимание различных стратегий выбора пороговых значений. Главной целью этой работы является исследование методов пороговой сегментации изображений для построения математической модели быстрой обработки данных при распознавания изображений. Оценивая принадлежность пиксела к сегменту компьютер нуждается алгоритма выбора оптимального метода сегментации. Для выбора адаптации решения к конкретному внешнего состояния нужно найти алгоритм, который обеспечит распознавание. В статье исследованы методы сегментации, которые осуществляются прежде всего с целью уменьшения избыточности информации для конкретных временных условий, оставляя в нем только информацию, необходимую для решения конкретной задачи в конкретный момент времени. В бинарном изображении интересующие нас части (например, контуры отображаемых объектов) должны быть сохранены, а незначительные черты (фон) исключены. Основная идея работы является основой для обучения математике в системе восприятия образов. В частности, компьютер должен чувствовать и понимать динамику реального мира. Поэтому автор исследует модели и средства синтеза методов восприятия данных зрительного спектра, находясь в режиме реального времени.

Ключевые слова: распознавание изображений; сегментация изображений; роботизированное зрение.

V.V. HRYTSYK
Lviv Polytechnic National University

RESEARCH OF IMAGE SEGMENTATION METHODS FOR THEIR UNIFICATION

The paper presents the author's research in the direction of reviewing effective methods of segmentation that can be used in the educational process today. The basic solutions and their mathematical substantiation are analyzed in the work. The main limitations of application and problem areas of application are shown. The paper describes the basic principles of threshold determination. Threshold methods are one of the easiest to implement and most widely used methods of image segmentation. The purpose of the threshold is to divide the image into regions with specified characteristics and delete all other regions that are considered insignificant. The material presented in this paper provides a basic understanding of the different strategies for selecting thresholds.

The main goal of this paper is review of image segmentation methods. The necessity of constructing a mathematical model arises immediately when using a computer for image processing. By evaluating the "eye" affiliation of a pixel to a particular segment, we do not think about how it is done but for computer we need write algorithm. If the task is some adaptation, we need to have written all possibility conditions. Instructing this computer, we have to teach him to perform similar actions, that is, to put in it the corresponding data and algorithms.

The paper investigates the methods of segmentation that are carried out primarily in order to reduce the information redundancy of the image for specific time conditions, leaving it only the information that is needed to solve a particular task at a specific time point. In the binary image, the parts that are of interest to us (for example, the outlines of the displayed objects) must be preserved and insignificant features (background) are excluded.

The main idea is form the basis for teaching math in the system of perception. In particular, the computer should feel and understand the dynamics of the real world.

Therefore, the author investigates the models and means of synthesizing the methods of perception of data of the visual spectrum, arriving in real time.

Global threshold method, multilevel threshold method, semithreshold method, variable threshold method are studied in the paper. Mathematical base is studied and presented in the article. Mathematic of image processing is integrated in the end of every part.

Keywords: pattern recognition, image segmentation, computer vision.

Постановка проблеми

Для постановки проблеми розглянемо задачу, які генерують основну проблему: 4-а промислова революція (сьогодні у 1-му десятку країн, що задають темпи розвитку на усій планеті, ІТ та виробництво сплелися настільки, що участь у технологічно процесі людей – це скоріше швидкослабнуча психологічна і фінансова складові, ніж технологічна); Сюди ж можна додати і сферу обслуговування: фінансові і страхові сектори, Інтернет послуги, продажі тощо [3, 5–7].

Тому, автор бачить потребу у підготовці спеціалістів, що будуть відповідати за сприйняття інформації, що надходять в режимі реального часу [2–4] в найбільш інформативному діапазоні спектру – візуальному.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відкриття останнього десятиліття створило можливість реалізовувати повністю автоматизовані адаптивні кібернетичні системи. Сьогодні, автоматизовані самокеровані авто та автоматизовані заводи з адаптивним виробництвом – це реальність. Автоматизовані кадровики приймають рішення про те чи працювати вам на високооплачуваній роботі. Роботизовані системи обслуговують людей при покупках і засобах доставки (від планування, автоматизовані сортування, кораблі автомобілі та погрузка). Починає працювати комп'ютерний зір, розпізнавання мови, ми починаємо розуміти процеси, що відбуваються у мозку. Автоматична ідентифікаційна система Департаменту США, для видачі віз обробляє більш семи десяти п'яти мільйонів фотографій на рік. Вертикальні ферми стали прототипом харчування наступного витка кібернетичних технологій.

Динаміка появи нових концепцій, методів та відповідних можливостей (теоретичні, прикладні розробки) [1] швидко прямує до точки, коли суспільство дійде до того моменту, коли в прогнозі розвитку людства однією із найбільш ймовірних моделей розвитку буде модель, при якій люди повністю або на 99% втрачають контроль за розвитком подій. Прикладом такого твердження є пошукові інтернет системи, коли людина читає тільки перший десяток результатів із тисяч можливих. Можливо таке припущення для людей, поза сферою досліджень адаптивних ІТ, видається дещо передчасним, але гіршим сценарієм є те що це єдино можлива модель розвитку.

Для підготовки роботи досліджено та використано роботи таких відомих вчених як Розенфельд, Хамадані, Ріхтер, Оцу, Кітлер, Лі, Саху та ін. [2–4, 11–17].

Мета дослідження

Метою роботи є проведення огляду базису сегментації з метою формулювання оптимізованого представлення концепції розпізнавання для подальшої підготовки фахівців з розробки адаптивних систем сприйняття зовнішнього світу.

Викладення основного матеріалу дослідження

1. Метод глобального порогу.

Метод глобального порогоування використовується для виділення об'єктів, що цікавлять значення, відмінні від фону при явному припущенні, що корисні об'єкти – темні на світлому фоні або світлі на темному фоні.

Кожен піксель класифікується як належний до об'єкту, що цікавить, або до заднього плану. Класифікація здійснюється шляхом присвоєння пікселю значення 1, якщо значення вихідного зображення знаходиться в заданому пороговому діапазоні, а 0 – в іншому випадку.

Для математичного опису процедури глобального порогу приймемо, що $a \in \mathbb{R}^X$ – вихідне зображення і $[h, k]$ є заданим пороговим діапазоном. Порогове значення $b \in \{0,1\}^X$ визначається як

$$b(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } h \leq a(x) \leq k \\ 0, & \text{otherwise (інші випадки)} \end{cases};$$

для всіх $x \in X$.

Два окремі випадки цієї методології стосуються відокремлення рівномірно високих значень або рівномірно низьких значень. У першому порогове зображення b буде задано

$$b(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } a(x) \geq k; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

тоді як у другому випадку

$$b(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } a(x) \leq k; \\ 0, & \text{otherwise (інші випадки)}; \end{cases}$$

де k позначає відповідне значення порогу.

Алгебричне представлення глобального порогу. Нехай $a \in \mathbb{R}^X$ – вихідне зображення і $[h, k]$ є заданим пороговим діапазоном. Порогове зображення $b \in \{0,1\}^X$ можна обчислити за допомогою характерної функції

$$B := X_{[h, k]}(a).$$

Характерні функції

$$B := X \geq k(a) \quad \text{і} \quad b := X \leq k(a)$$

можуть використовуватися для виділення об'єкта відповідно високих і низьких значень.

Коментарі. Глобальний поріг ефективний при ізоляції об'єктів, що мають однакове значення, розміщених проти фону різних значень. Практичні проблеми виникають, коли фон нерівномірний або коли об'єкт і фон приймають широкий діапазон значень. Зауважте, також, що

$$b := X[h, k](a) : (X \geq h(a), X \leq k(a)).$$

2. Напівпорог.

Напівпорогове значення є корисним варіантом глобального порогу у випадку, якщо значення пікселів лежать в заданому пороговому діапазоні і зберігають свої

початкові значення. Пікселі зі значеннями, що лежать поза межами порогового діапазону, встановлюються 0. Для вихідного зображення $a \in \mathbb{R}^X$ з пороговим діапазоном $[h, k]$ напівпорогове зображення $b \in \mathbb{R}^X$ задається як $a \in \mathbb{R}^X$:

$$b(x) = \begin{cases} a(x), & \text{if } h \leq a(x) \leq k; \\ 0, & \text{otherwise (інші випадки);} \end{cases}$$

для всіх $x \in X$.

Два окремі випадки цієї методології стосуються відокремлення рівномірно високих значень або рівномірно низьких. У першому порогове зображення b дає

$$b(x) = \begin{cases} a(x), & \text{if } a(x) \geq k; \\ 0, & \text{otherwise (інші випадки);} \end{cases},$$

тоді як у другому випадку

$$b(x) = \begin{cases} a(x), & \text{if } a(x) \leq k; \\ 0, & \text{otherwise (інші випадки);} \end{cases},$$

де k позначає відповідний поріг значення.

Алгебричне представлення напівпорогового методу. Формулювання алгебри зображення для напівпорогового зображення $b \in \mathbb{R}^X$ за діапазоном значень $[h, k]$ є

$$b := a \cdot X_{[h, k]}^a.$$

Напівпоріг зображень над безмежними наборами $[k, \infty)$ & $(-\infty, k]$ дається як

$$b(x) := a \cdot X \geq k^{(a)} \quad \text{і} \quad b(x) := a \cdot X \leq k^{(a)},$$

відповідно.

Альтернативне формулювання алгебри зображень. Напівпорогове зображення також може бути отримане шляхом обмеження вихідного зображення до тих точок, значення яких лежать у пороговому діапазоні, а потім розширюють обмеження до X зі значенням 0. Формування алгебри зображення для цього методу напівпорогового значення є

$$b := (a|_{[h, k]})^0.$$

Якщо потрібно, замість побудови a результат понад X можна побудувати підмножину c або a містять лише ті пікселі, що лежать у пороговому діапазоні, тобто

$$c := a|_{[h, k]}.$$

Коментарі. Напівпоріг є варіантом глобального порогу для випадку, якщо значення пікселів лежать в заданому пороговому діапазоні і зберігають свої початкові значення. Наприклад, фон є світлий, по краях фон чорний, корисні об'єкти сірі.

а. Багаторівневий поріг

Техніки глобальних порогів і напівпорогів, які розглянуто вище, ґрунтуються на припущенні, що зображення містить лише два типи областей. Для зображень, що

містять більше двох типів регіонів застосовують інші методи. Багаторівневе порогове значення є розширенням двох попередніх методів порогового визначення, що дозволяє здійснювати сегментацію пікселів у кілька класів [17].

Наприклад, якщо гістограма зображення містить три піки, сегментуйте зображення, використовуючи два пороги. Ці пороги ділять значення, встановлене на три діапазони без відкриття, кожний з яких може бути пов'язаний з отриманим унікальним значенням зображення.

Алгебричне представлення багаторівневого порогу. Нехай $a \in \mathbb{R}^X$ є вихідним зображенням, і нехай k_1, \dots, k_n є пороговими значеннями, що задовольняють умові $k_1 > k_2 > \dots > k_n$. Ці значення розділяють \mathbb{R} на $(n+1)$ інтервали, які пов'язані зі значеннями v_1, \dots, v_{n+1} у пороговому зображенні результату. А типовою може бути послідовність значень результатів $1, \frac{n-1}{n}, \dots, \frac{1}{n}, 0$. Порогове зображення $b \in \mathbb{R}^X$ визначається через

$$b(x) = \begin{cases} v_1, & \text{if } k_1 < a(x); \\ v_i, & \text{if } k_i < a(x) \leq k_{i-1}; \\ v_{n+1}, & \text{if } a(x) < k_n. \end{cases}$$

Формулювання алгебри зображень. Визначимо функцію $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ через

$$f(r) = \begin{cases} v_1, & \text{if } k_1 < r \\ v_i, & \text{if } k_i < r < k_{i-1} \\ v_{n+1}, & \text{if } r \leq k_n, \end{cases}$$

Порогове зображення $b \in \mathbb{R}^X$ можна обчислити компонуванням f з a , а саме:

$$b: = f \circ a.$$

б. Змінний поріг

Жоден пороговий рівень не може дати хороших результатів сегментації для цілого зображення. Порогова змінна дозволяє застосовувати різні порогові рівні до різних областей зображення.

Наприклад, об'єкти можуть контрастувати з фоном у всьому зображенні, але через нерівномірне освітлення об'єкти та фон можуть мати нижчі значення з одного боку зображення, ніж на іншому. У таких випадках зображення можна підрозділити на менші регіони. Потім встановлюються порогові значення для кожного регіону та глобального (або іншого) порогу застосовується до кожної підмножини, що відповідає регіону [12].

Точна методологія така. Нехай $a \in \mathbb{R}^X$ є вихідним зображенням та нехай зображення $d \in \mathbb{R}^X$ позначають порогове значення області, пов'язане з кожною точкою в X це є $d(x)$ – порогове значення, пов'язане з регіоном, в якому знаходиться точка x , що не належить цьому регіону. Порогове зображення $b \in \{0,1\}^X$ визначається через

$$b(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } a(x) \geq d(x); \\ 0, & \text{if } a(x) < d(x). \end{cases}$$

Формулювання алгебри зображень. Порогове зображення b можна обчислити так:

$$b: = X \geq d(a).$$

Коментарі. Змінне порогове значення ефективно для зображень з локально бімодальною гистограмою. Цей метод дасть бажані результати, якщо об'єктів порівняно мало і вони не групуються занадто близько один до одного. Субмагнітажі повинні бути досить великими, щоб містити як фонові, так і пікселі об'єкта.

Ті ж проблеми, що виникають при глобальному порозі, можуть виникати на місцевому рівні при змінному порозі. Таким чином, якщо зображення має місцеве неоднорідне тло або великі діапазони значень у деяких регіонах або якщо мультимодальна гистограма не розрізняє об'єкт і фон, метод дасть поганий результат. Крім того, важко визначити зображення d без деякої апріорної інформації.

с. Вибір порогу з використанням середнього та стандартного відхилення.

У цьому розділі покажемо перший з трьох методів автоматичного порогоування порогів. Конкретний поріг, отриманий тут, є лінійною комбінацією, $k_1\mu + k_2\sigma$, середнє і стандартне відхилення вихідного зображення і було запропоновано Хамадані. Середнє і стандартне відхилення – це внутрішні властивості вихідного зображення. Ваги k_1 і k_2 попередньо вибираються на основі інформації про тип зображення, щоб оптимізувати продуктивність.

Для отриманого зображення $a \in \mathbb{R}^X$ де X є сітка $m \cdot n$, середнього значення μ і стандартне відхилення σ з a даються

$$\mu = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a(i, j)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (a(i, j) - \mu)^2},$$

відповідно. Пороговий рівень τ встановлено на

$$\tau = k_1\mu + k_2\sigma,$$

де константи k_1 і k_2 залежать від типу зображення.

Формулювання алгебри зображень. Нехай $a \in \mathbb{R}^X$ де $X = Z_m \cdot Z_n$. Середнє та стандартне відхилення задаються висловлюваннями алгебри зображень:

$$\mu := \frac{1}{mn} \sum a;$$

$$\sigma := \sqrt{\frac{1}{mn} \sum (a - \mu)^2}.$$

Пороговий рівень отриманий з

$$\tau := k_1\mu + k_2\sigma.$$

Коментарі. Для типових ІЧ-зображень низької роздільної здатності $k_1=k_2=1$ здається, працює досить добре для видобутку «теплих» об'єктів. Для більш високої роздільної здатності $k_1=1$ або $k_1=1.5$ і $k_2=2$ може дати кращі результати.

d. Вибір порогу шляхом максимального відхилення між класами

У цьому розділі ми представляємо метод Оцу [18–19] для знаходження порогу параметри, які будуть використовуватися в схемах з декількома пороговими показниками. Для заданого k метод знаходить пороги $0 \leq \tau_1 < \tau_2 \dots < \tau_{k-1} < l-1$ для розділення пікселів $a \in (\mathbb{Z}_l)^X$ на класи:

$$\begin{aligned} C_0 &= \{ (x, a(x)) : 0 \leq a(x) \leq \tau_1 \}, \\ C_i &= \{ (x, a(x)) : \tau_i < a(x) \leq \tau_{i+1} \}, \\ C_{k-1} &= \{ (x, a(x)) : \tau_{k-1} < a(x) \leq l-1 \}, - \end{aligned}$$

шляхом максимального розрізнення між класами. Дисперсія між класом використовується як міра відокремленості між класами. Визначення приналежності пікселя до класу, використовує гістограму інформації, яка отримана з вихідного зображення. Після визначення порогових значень, їх можна використовувати як параметри багатопорогового (multilevel) алгоритму.

Нехай $a \in (\mathbb{Z}_l)^X$ і нехай \bar{h} є нормалізованою гістограмою a . Пікселі повинні бути розділені на k групи C_0, C_1, \dots, C_{k-1} шляхом вибору τ_i як зазначено нижче.

Ймовірність виникнення класу $\Pr(C_i)$ даються за формулами:

$$\begin{aligned} \Pr(C_0) &= w_0 = \sum_{j=0}^{\tau_1} \bar{h}(j) = w(\tau_1); \\ \dots \\ \Pr(C_i) &= w_i = \sum_{j=\tau_i+1}^{\tau_{i+1}} \bar{h}(j) = w(\tau_{i+1}) - w(\tau_i); \\ \dots \\ \Pr(C_{k-1}) &= w_{k-1} = \sum_{j=\tau_{k-1}+1}^{l-1} \bar{h}(j) = 1 - w(\tau_{k-1}); \end{aligned}$$

де $w(\tau_i) = \sum_{j=0}^{\tau_i} \bar{h}(j)$ – кумулятивний момент гістограми, що оцінюється до τ_i рівня.

Середні рівні класу задаються формулами:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \sum_{j=0}^{\tau_1} \frac{j \cdot \bar{h}(j)}{w_0} = \frac{\mu(\tau_1)}{w(\tau_1)}; \\ \mu_i &= \sum_{j=\tau_i+1}^{\tau_{i+1}} \frac{j \cdot \bar{h}(j)}{w_i} = \frac{\mu(\tau_{i+1}) - \mu(\tau_i)}{w(\tau_{i+1}) - w(\tau_i)}; \\ \mu_{k-1} &= \sum_{j=\tau_{k-1}+1}^{l-1} \frac{j \cdot \bar{h}(j)}{w_{k-1}} = \frac{\mu_l - \mu(\tau_{k-1})}{1 - w(\tau_{k-1})} \end{aligned}$$

тут $\mu(\tau_i) = \sum_{j=0}^{\tau_i} j \cdot \bar{h}(j)$ – кумулятивне значення гістограми до τ_i ; $\mu = \sum_{j=0}^{l-1} j \cdot \bar{h}(j)$ – загальний середній рівень a .

Для того, щоб оцінити придатність порогів на рівні $0 \leq \tau_1 < \tau_2, \dots < \tau_{k-1} < l-1$, дисперсія між класом використовується як дискримінантний критерій міри відокремленості класу. Ця дисперсія між класом σ_b^2 визначається як

$$\sigma_b^2 = w_0 (\mu_0 - \mu)^2 + w_1 (\mu_1 - \mu)^2 \dots + w_{k-1} (\mu_{k-1} - \mu)^2,$$

що еквівалентно,

$$\sigma_b^2 = w_0 \mu_0^2 + \dots + w_{k-1} \mu_{k-1}^2 - \mu^2.$$

Тут, σ_b^2 є функцією від $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}$ (якщо підставити відповідні вирази за участю τ_i). Проблема визначення придатності τ_i зводиться до оптимізації σ_b^2 , тобто, до знаходження максимуму $\sigma_b^2(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$; або

$$\max \{ w_0 \mu_0^2 + w_1 \mu_1^2 \dots + w_{k-1} \mu_{k-1}^2 - \mu^2 : 0 \leq \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_{k-1} < l-1 \}$$

Формулювання алгебри зображень. Розглянемо формулювання алгебри зображень алгоритму для $k=3$ групи.

Він легко узагальнюється для інших k : ($1 \leq k < l-1$).

Нехай $a \in (\mathbb{Z}_l)^X$ є вихідним зображенням. Нехай h і c є нормована гістограма і нормалізована кумулятивна гістограма a відповідно. Зображення кумулятивного моменту першого порядку задано формулою

$$u := \sum t(\bar{h}),$$

де визначений параметризований шаблон

$$t(a)_j(i) = \begin{cases} j \cdot a(j), & \text{if } j \leq i; \\ 0, & \text{otherwise (в іншому випадку)}. \end{cases}$$

Коментарі. Цей алгоритм є алгоритмом без вчителя. Для великих k метод може давати погані результати, якщо класи надзвичайно добре розділені [15].

Висновки

У результаті проведеного аналізу методів сегментації зображення оптимізовано концепцію сприйняття теорії розпізнавання, зокрема, в частині сегментації зображень.

Список використаної літератури

1. Hrytsyk V., Grondzal A., Bilenkyj A. Augmented Reality for People with Disabilities. Proceedings of the International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT'2015 (Lviv, September 14–17, 2015). Lviv: Polytechnic National University, 2015. P. 188–191.
2. Audio-Visual Answer to Modern Computing. *Research*eu Results Supplement*. 2010. № 26. P. 31–32.
3. Мічо Кайку. Фізика майбутнього. Переклала з англ. Анжела Кам'янець. Львів: Літопис, 2013. 432 с.
4. Software: Running Commentary for Smarter Surveillance? *Research*eu Results Supplement*. 2010. № 24. P. 29.

5. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution: What it Means, How to Respond. *World Economic Forum*. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond>
6. Шваб К. Четверта промислова революція: як до неї готуватися (переклад). URL: <http://nubip.edu.ua/node/23076>
7. Kagermann H., Lukas W.-D., Wahlster W. 0 Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution (нім.). *VDI nachrichten*. 2011, April 1, №13. URL: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>;
8. Шмідт Ф., Бутирський З. Ганноверський ярмарок: Інтернет зливається з заводом. *Deutsche Welle*. 2013. URL: <http://www.dw.com/uk/ганноверський-ярмарок-інтернет-зливається-з-заводом/a-16728837>
9. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. URL: http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf
10. Business Insider. URL: <http://www.businessinsider.com/cyborgs-are-the-future-of-financial-advice-2017-2>
11. Stuart J. Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence a Modern Approach*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1995. 950 p.
12. Rosenfeld A., Kak A. *Digital Picture processing*. 2nd ed. New York: Academic Press, 1982. 476 с.
13. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *Proceedings of the IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979. Vol. SMC-9. P. 62–66.
14. Sahoo P. K., Soltani S., Wong A. C., Chen Y. C. A Survey of Thresholding Techniques. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. 1988. Vol. 41. P. 233–260.
15. Ritter Gerhard X., Wilson Joseph N. *Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra*. 2nd Ed. Boca Raton, London, New York, Washington: CRC press, 2000. 448 p.
16. Korzynska A., Roszkowiak L., Lopez C., Bosch R., Witkowski L., Lejeune M. Validation of Various Adaptive Threshold Methods of Segmentation Applied to Follicular Lymphoma Digital Images Stained with 3,3'-Diaminobenzidine&Haematoxylin. *Diagnostic Pathology*. 2013. Issue 8. Article number 48. DOI: 10.1186/1746-1596-8-48
17. Sauvola J. Pietikainen M. Adaptive document image binarization. *Pattern Recognition*. 2000, **33**, 225–236. DOI: 10.1016/S0031-3203(99)00055-2.
18. Hrytsyk V. V., Dunas A. Ya. Doslidzhennia metodiv rozpiznavannia obraziv dlia system kompiuternoho zoru robotiv maibutnoho. *Visnyk KhNTU*. 2017. № 3. Ч. 1, С. 297–301.

REFERENCES

1. Hrytsyk, V., Grondzal, A., Bilenkyj, A. (2015). Augmented Reality for People with Disabilities. *Proceedings of the International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT'2015 (Lviv, September 14–17, 2015)*. Lviv: Polytechnic National University, pp. 188–191.
2. Audio-Visual Answer to Modern Computing. (2010). *Research*eu Results Supplement*. **26**, 31–32.
3. Micho, Kaiku. (2013). *Fizyka maibutnoho*. Pereklala z anhl.. Anzhela Kamianets. Lviv: Litopys.
4. Software: Running Commentary for Smarter Surveillance? (2010). *Research*eu Results Supplement*. **24**, 29.
5. Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution: What it Means, How to Respond. *World Economic Forum*. Retrieved from: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond>

6. Schwab, K. The Fourth Industrial Revolution: how to prepare to Industry 4.0? (translate). Retrieved from: <http://nubip.edu.ua/node/23076>
7. Kagermann, H., Lukas, W.-D., & Wahlster, W. (2011). Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution (нім.). *VDI nachrichten*. **13**. Retrieved from: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>;
8. Schmidt, F., & Butyrskij, Z. (2013). Hannover exhibition: Internet-factory fusion. *Deutsche Welle*. Retrieved from: <http://www.dw.com/uk/ганноверський-ярмарок-інтернет-зливається-з-за заводом/a-16728837>
9. Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. Retrieved from: http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf
10. Business Insider. Retrieved from: <http://www.businessinsider.com/cyborgs-are-the-future-of-financial-advice-2017-2>.
11. Stuart, J. (1995). Russell and Peter Norvig. Artificial Intelligence a Modern Approach. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
12. Rosenfeld, A., & Kak A. (1982). Digital Picture processing. 2nd ed. New York: Academic Press.
13. Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *Proceedings of the IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. **9**, 62–66.
14. Sahoo, P. K., Soltani, S., Wong, A. C., & Chen, Y. C. (1998). A Survey of Thresholding Techniques. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. **41**, 233–260.
15. Ritter Gerhard X., Wilson Joseph N. (2000). Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra. 2nd Ed. Boca Raton, London, New York, Washington: CRC press.
16. Korzynska, A., Roszkowiak, L., Lopez, C., Bosch, R., Witkowski, L., & Lejeune, M. (2013). Validation of Various Adaptive Threshold Methods of Segmentation Applied to Follicular Lymphoma Digital Images Stained with 3,3'-Diaminobenzidine&Haematoxylin. *Diagnostic Pathology*. **8**, 48. DOI: 10.1186/1746-1596-8-48
17. Sauvola, J., & Pietikainen, M. (2000). Adaptive document image binarization. *Pattern Recognition*. **33**, 225–236. DOI: 10.1016/S0031-3203(99)00055-2.
18. Hrytsyk, V. V., & Dunas, A. Ya. Doslidzhennia metodiv rozpiznavannia obraziv dlia system kompiuternoho zoru robotiv maibutnoho. *Visnyk KhNTU*. **3**, 1, 297–301.

Грицик Володимир Володимирович – д.т.н., професор Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: volodymyrhrytsyk@gmail.com.

УДК 631.445.52

Г.П. ЕВГРАШКИНА
Днепропетровский национальный университет
Н.Н. ХАРИТОНОВ

Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗ СОЛЕВЫХ РЕЖИМОВ ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ В АРИДНЫХ РЕГИОНАХ

Прогноз солевого режима орошаемых земель является обязательной составной частью комплекса изысканий и исследований для целей мелиоративного строительства, реконструкции оросительных систем в процессе их эксплуатации. Особой темой является оценка риска засоления подовых почв на юге Украины. В основу современных методов прогнозирования солепереноса положена теория физико-химической гидродинамики пористых сред. Согласно этой теории, процессы массопереноса описываются дифференциальными уравнениями движения и сохранения массы вещества второго порядка в частных производных эллиптического и параболического типов. Для решения практических задач используют одномерные варианты этих уравнений. Это объясняется тем, что солеперенос в зоне аэрации проходит преимущественно в вертикальном направлении. Цель исследований: обосновать возможные оптимальные модели вертикального солепереноса на примере орошаемых земель. Объект исследований представлен подовым понижением земной поверхности в Солонянском районе Днепропетровской области. Соответственно сделанным шагам была составлена схема солепереноса. Начало координат было привязано к поверхности земли. Для этого было задано граничное условие III-рода Данквертса–Бреннера. Его физический смысл: количество солей, которое поступает на поверхность земли в процессе орошения, рассеивается в зоне аэрации по законам молекулярной и конвективной диффузии. Определение миграционных параметров выполняем путем решения инверсной задачи. Скорость вертикального влагопереноса определяем балансовым методом. Для определения параметра гидродисперсии засоление определяли в трех точках по вертикали, применив аналитическое решение Веригина. Прогноз солевого режима почв в подовом понижении на территории предполагаемого орошения с засоленностью 0.9% был выполнен с учетом исходных данных. Проведенные расчеты позволили определить значения параметров солепереноса. Согласно выполненным расчетам засоление почвы на поверхности исследуемой территории составит 0.322%. После увеличения оросительной нормы процесс расчета был выполнен снова. Результаты расчета показывают, что при заданном режиме орошения рассоление верхнего метрового слоя (до содержания солей менее 0,25%) в течение 5 лет не произойдет без увеличения оросительной нормы до $3000\text{ м}^3/\text{га}$.

Ключевые слова: математическое моделирование; массоперенос; зона аэрации; водные вытяжки; почвенные растворы; орошаемое земледелие.

Г.П. ЄВГРАШКІНА
Дніпровський національний університет
М.М. ХАРИТОНОВ

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗ СОЛЬОВИХ РЕЖИМІВ ЗРОШУВАНИХ ЗЕМЕЛЬ В АРІДНИХ РЕГІОНАХ

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.9

Прогноз сольового режиму зрошуваних земель є обов'язковою складовою частиною комплексу досліджень і досліджень для цілей меліоративного будівництва, реконструкції зрошувальних систем в процесі їх експлуатації. Особливою темою є оцінка ризику засолення подових ґрунтів на півдні України. В основу сучасних методів прогнозування солепереносу покладена теорія фізико-хімічної гідродинаміки шпаруватих середовищ. Відповідно до цієї теорії, процеси масопереносу описуються диференціальними рівняннями руху і збереження маси речовини другого порядку в приватних похідних еліптичного і параболічного типів. Для вирішення практичних завдань використовують одновимірні варіанти цих рівнянь. Це пояснюється тим, що солеперенос в зоні аерації проходить переважно у вертикальному напрямку. Мета досліджень: обґрунтувати можливі оптимальні моделі вертикального солепереносу на прикладі зрошуваних земель. Об'єкт досліджень представлений подовим пониженням земної поверхні в Солонянському районі Дніпропетровської області. Відповідно зробленим крокам була складена схема солепереносу. Початок координат був прив'язаний до поверхні землі. Для цього було задано граничну умову III-роду Данквертса-Бреннера. Його фізичний сенс: кількість солей, яке надходить на поверхню землі в процесі зрошення, розсіюється в зоні аерації за законами молекулярної і конвективної дифузії. Визначення міграційних параметрів виконуємо шляхом вирішення інверсного завдання. Швидкість вертикального вологопереносу визначаємо балансовим методом. Для визначення параметра гідродисперсії засолення визначали в трьох точках по вертикалі, застосувавши аналітичне рішення Верігіна. Прогноз сольового режиму ґрунтів в Подовому зниженні на території передбачуваного зрошення з засоленістю 0.9% був виконаний з урахуванням вихідних даних. Проведені розрахунки дозволили визначити значення параметрів солепереносу. Згідно з виконаними розрахунками засолення ґрунту на поверхні досліджуваної території складе 0.322%. Після збільшення зрошувальної норми процес розрахунку був виконаний знову. Результати розрахунку показують, що при заданому режимі зрошення розсолення верхнього метрового шару (до вмісту солей менше 0,25%) протягом 5 років не відбудеться без збільшення зрошувальної норми до 3000м³/га.

Ключові слова: математичне моделювання; масоперенос; зона аерації; водні витяжки; ґрунтові розчини; зрошуване землеробство.

G.P. YEVGRASHKINA

Dnipro National University

M.M. KHARYTONOV

Dnipro State Agrarian and Economic University

AN ENVIRONMENT ASSESSMENT, MODELLING AND FORECAST OF THE SALTED REGIMES OF IRRIGATED ARABLE LANDS IN ARID REGIONS

The forecast of the salt regime of irrigated lands is an obligatory part of the complex of surveys and research for the goals of meliorative building, reconstruction of irrigation systems in the course of their operation. Assessment of the salinization risk of pod soils in the south of Ukraine is a special topic. The theory of physical and chemical hydrodynamics of porous media is the basis for modern methods of predicting salts transfer. Mass transfer processes are described by differential equations of motion and conservation of matter mass of the second order in partial derivatives of elliptic and parabolic types according to this theory. One-dimensional versions of these equations are used for solving practical problems. This is due to the fact that salt transfer in the aeration zone takes place mainly in the vertical direction. The purpose of the research was to substantiate the possible optimal models of the

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.9

vertical salt transfer at the example of irrigated land. The object of research is represented by the subgrade of the earth's surface in the Solonyansky district of the Dnipropetrovsk province. The scheme of salts transfer was drawn up according to the steps taken. The origin of the coordinates was linked to the earth's surface. The boundary condition of the III-kind of Danckwerts–Brenner was specified for it. Its physical meaning: the amount of salt that enters the earth's surface during irrigation is dispersed in the aeration zone according to the laws of molecular and convective diffusion. The migration parameters were determined by solving an inverse problem. The rate of vertical moisture transfer was determined by the balance method. Salinity was determined at three vertical points using Verigin's analytical solution to determine the hydrodispersion parameter. The forecast of the soil salt regime in the annual decrease in the territory of the proposed irrigation with a salinity of 0.9% was made taking into account the initial data. The calculations made it possible to determine the values of the parameters of salts transfer. According to the calculations, the salinity of the soil on the surface of the study area will be 0.322%. The calculation process was performed again after increasing the irrigation rate. The results of the calculation show that under a given irrigation regime, the upper meter layer will not be desalinated (when salt content less than 0.25%) for 5 years without increasing the irrigation rate to 3000 m³/ha.

Keywords: mathematical modeling; mass transfer; aeration zone; water extracts; soil solutions; irrigated farming.

Постановка проблемы

Прогноз солевого режима орошаемых земель является обязательной составной частью комплекса изысканий и исследований для целей мелиоративного строительства, реконструкции оросительных систем в процессе их эксплуатации. В основу современных методов прогнозирования солепереноса положена теория физико-химической гидродинамики пористых сред. Согласно этой теории, процессы массопереноса описываются дифференциальными уравнениями движения и сохранения массы вещества второго порядка в частных производных эллиптического и параболического типов. Двух и трехмерные уравнения солепереноса очень трудно обеспечить исходной информацией для решения инверсной задачи по определению миграционных параметров. Для решения практических задач используют одномерные варианты этих уравнений. Это объясняется тем, что солеперенос в зоне аэрации проходит преимущественно в вертикальном направлении. В этом случае можно предложить адекватное аналитическое решение задачи.

Анализ последних исследований и публикаций

Оценка риска засоления подовых почв является актуальной проблемой на юге Украины. Подами называют сравнительно крупные округлые замкнутые депрессии с хорошо выраженными склонами различной крутизны, плоским днищем и сложившейся вокруг них эрозионной сетью [1]. В границах подов формируется большое разнообразие засоленных (галогенных) почв, включая солончаки, солонцы и солоды [2]. Солончаки формируются при наличии неглубокого уровня засоленных грунтовых вод (0,5–1,5 м), а солонцы образуются в случае более глубокого залегания грунтовых вод при доминировании катиона натрия в составе растворимых солей.

На сегодняшний день решение разнообразных задач диффузии и массопереноса в условиях орошения делается с проведением непрерывного мониторинга и прогнозирования водно-солевых режимов почв методами, связанными с разработкой моделей и программ [3–4]. Преобладание восходящих или нисходящих потоков влаги в зоне неполного водонасыщения диктует необходимость детального описания взаимосвязанных процессов влаго- и солепереноса [5–7].

Цель исследований

Обосновать возможные оптимальные модели вертикального солепереноса на примере орошаемых земель.

Изложение основного материала исследования

Объект исследований представлен подовым понижением земной поверхности в Солонянском районе Днепропетровской области. Количество выпавших осадков за год составило 476 мм.

Наиболее полно процесс солепереноса описывает следующее уравнение [8]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (VC) + \beta(C_s - C) - \gamma(C_\gamma - C) = m \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (1)$$

где D – коэффициент гидродисперсии, комплексный обобщенный параметр учитывающий все факторы рассеивания вещества, сопутствующие влагопереносу и фильтрации, м²/сут;

C – минерализация подземных вод в зоне полного водонасыщения и почвенных растворов в зоне аэрации, г/дм³;

V – скорость фильтрации в зоне полного водонасыщения и скорость вертикального влагопереноса в зоне аэрации, где вода движется преимущественно по вертикали, м/сут;

β – коэффициент растворения солей твердой фазы, сут⁻¹;

C_s – концентрация предельного насыщения, г/дм³;

γ – коэффициент поглощения солей из оросительной воды почвами и породами зоны аэрации, сут⁻¹;

C_γ – концентрация предельного поглощения, г/дм³;

m – активная пористость, доли единицы в зоне полного водонасыщения или объемная влажность в зоне аэрации;

x – пространственная координата, расстояние от начала координат до расчетной точки, м;

t – временная координата, срок прогнозного расчета, сут

Слагаемое $\gamma(C_\gamma - C)$ равно нулю, если вода, используемая для орошения, соответствует научно-обоснованным критериям качества для данного региона. Ранее было математически доказано следующее: если начальное засоление для дальнейших прогнозных расчетов его изменения под влиянием орошения на различные сроки представлено в результатах химического анализа водных вытяжек, то исходное уравнение (1) упрощается существенно [9]. Водные вытяжки содержат все растворившиеся соли, которые до орошения присутствовали в твердой фазе. Поэтому слагаемое $\gamma(C_\gamma - C) = 0$. Скорость вертикального влагопереноса определяется балансовым методом, как средняя величина для зоны аэрации и слагаемое $\frac{\partial}{\partial x} (VC)$ заменяется на $V \frac{\partial C}{\partial x}$. Небольшая мощность зоны аэрации позволяет использовать в расчетах среднее значение параметра D . Тогда уравнение (1) примет вид:

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} = m \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (2)$$

где C – засоленность почв и пород зоны аэрации, определенная по результатам химического анализа водных вытяжек и выраженная в процентах от массы сухой почвы.

Это уравнение имеет несколько аналитических решений, частных для различных граничных условий. Основываясь на наших исследованиях можно утверждать, что наиболее достоверные результаты соответствуют аналитическому решению Данкверста–Бреннера [10]. Оно имеет следующий вид:

$$\bar{C} = 0.5 \left[\operatorname{erfc} z_2 + e^{-z_1^2 - z_2^2} (\operatorname{erfc} z_1 - 4a \operatorname{ierfc} z_1) \right], \quad (3)$$

где $\bar{C} = \frac{C - C_c}{C_0 - C_c}$; $z_1 = a(1 + \bar{x})$; $z_2 = a(1 - \bar{x})$; $\bar{x} = \frac{x}{x_0}$; $x_0 = \frac{Vt}{m}$; $a = \frac{\frac{V}{m} \sqrt{t}}{2\sqrt{\frac{D}{m}}}$.

В выражениях (3) приняты следующие обозначения \bar{C} – приведенная засоленность, безразмерная величина; C – прогнозное засоление, % массы сухого грунта;

C_c – текущее значение засоленности водопоступления, % массы сухой почвы;

\bar{x} – приведенная пространственная координата, безразмерная величина;

x_0 – мощность зоны максимального увлажнения, м;

C_0 – начальное засоление, % массы почвы;

$\operatorname{erfc} z_2, \operatorname{erfc} z_1, \operatorname{ierfc} z_1$ – табулированные интегральные функции.

Составляем схему солепереноса. Начало координат выбираем на поверхности земли. Граничное условие III-рода Данквертса–Бреннера задается для этого. Оно имеет следующий вид:

$$V = V_2 - V_1; V \cdot (C_c - C_0) = D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

Физический смысл граничного условия (4): количество солей, которое поступает на поверхность земли в процессе орошения рассеивается в зоне аэрации по законам молекулярной и конвективной диффузии.

Здесь V_1 – скорость восходящего потока влаги под влиянием атмосферных осадков и орошения, м/сут;

V_2 – скорость нисходящего потока влаги под влиянием атмосферных осадков и орошения, м/сут;

Определение миграционных параметров выполняем путем решения инверсной задачи. Скорость вертикального влагопереноса определяем балансовым методом. Для условий орошения формула для определения V имеет следующий вид:

$$V = \frac{A + O - (I + T)}{1000 \cdot t}, \quad (5)$$

где V – скорость вертикального влагопереноса за год или другой расчетный период t , м/сут;

A – количество атмосферных осадков за тот же период, мм;

O – оросительная норма, мм;

$(I + T)$ – суммарное испарение (испарение через поверхность почвы плюс транспирация), мм;

Для нахождения значения параметра гидродисперсии D нужно определить засоление в трех точках по вертикали и применить аналитическое решение Веригина [11]:

$$D = \frac{V \cdot \Delta x}{\ln(\bar{C} - 1)}; \bar{C} = \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_3}; \quad (6)$$

где V – скорость вертикального влагопереноса, м/сут.

Δx – расстояние между расчетными точками, м;

C_1, C_2, C_3 – засоленность почв в расчетных точках 1,2,3, %;

Объемная влажность m при отсутствии экспериментальных данных принимают равной 0.18-0.22 [8].

Прогноз солевого режима почв в подовом понижении на территории предполагаемого орошения с засоленностью 0.9% был выполнен с учетом исходной информации при следующих данных: $A = 476$ мм/год; $(I + T) = 565$ мм/год; $O = 200$ мм; $t = 5$ лет.

Проведенные расчеты согласно формулам 4 и 5 позволили определить значения параметров солепереноса: $V = 0.0003$ м/сут; $C_c = 0.001$ %.

По формуле (3) определяем величины $x_0; \bar{x}; a; z_1; z_2$. Затем находим прогнозную засоленность на поверхности земли (при условии $x = 0$) и в остальных расчетных точках.

Последовательность выполнения расчета представлены в табл. 1.

Согласно выполненным расчетам засоление почвы на поверхности исследуемой территории составит 0.322%. Полное рассоление соответствует 0,25% [8]. После увеличения оросительной нормы процесс расчета был выполнен снова.

Таблица 1

Расчетные значения параметров солепереноса

№ расчетной точки	X, m	z_1	z_2	z_1^2	z_2^2	$[e^{z_1^2 - z_2^2}]$	$erfcz_2$	$erfcz_1$	$ierfcz_1$	\bar{C}	$C, \%$
0	0	0.45	0.45	0.20	0.20	1.000	0.524	0.524	0.225	0.32	0.322
1	0.25	0.49	0.41	0.24	0.17	1.070	0.562	0.488	0.205	0.35	0.349
2	0.5	0.53	0.37	0.28	0.14	1.156	0.601	0.453	0.545	0.37	0.370

Результаты расчета показывают, что рассоление верхнего метрового слоя (до содержания солей менее 0,25%) в течение 5 лет произойдет при увеличении оросительной нормы до 3000 м³/га.

Выводы

В основе математических моделей солепереноса на орошаемых землях положена теория физико-химической гидродинамики пористых сред, согласно которой этот процесс описывается уравнениями движения и сохранения вещества. Использование в прогнозных расчетах минерализации водных вытяжек вместо почвенных растворов позволяет упростить структуру уравнений и подготовку расчетных параметров. Решение серии прямых задач массопереноса дает возможность выбрать оптимальную оросительную норму, позволяющую рассолить верхний метровый слой аэрации за нужный период времени. Решение эпигнозных задач позволяет повысить достоверность определения миграционных параметров.

Список использованной литературы

1. Онойко Ю. Ю. Галогенні ґрунти подів межиріччя Дніпро–Молочна. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2013. Вип. 46. С. 284–291.
2. Евдокимова Т. И., Быковская Т. К. Почвы подовых понижений юга Украины. Москва: МГУ, 1985. 96 с.
3. Бородычев В. В., Дедова Э. Б., Сазанов М. А., Лытов М. Н. Моделирование процесса управления водно-солевым режимом почв в условиях орошения. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2016. № 2 (42). С. 26–33.
4. Фалькович А. С., Пронько Н. А. Прогноз водно-солевого режима почвогрунтов при разработке проекта реконструкции оросительной системы и определение параметров миграции влаги и солей. *Вопросы мелиорации и водного хозяйства Саратовской области*. Саратов: СГАУ, 2002. С. 23–33.
5. Nachshon U. Cropland Soil Salinization and Associated Hydrology: Trends, Processes and Examples. *Water*. 2018. № 10. 21 p. DOI:10.3390/w10081030
6. Bouksila F. et al. Assessment of Soil Salinization Risks under Irrigation with Brackish Water in Semiarid Tunisia. *Environmental and Experimental Botany*. 2013. Vol. 92. P. 176–185. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.06.002
7. Seydehmet Jumeniyaz, Hui Lv Guang, Nurmemet Ilyas, Aishan Tayierjiang, Abliz Abdulla, Sawut Mamat, Abliz Abdugheni, Eziz Mamattursun. Model Prediction of Secondary Soil Salinization in the Keriya Oasis, Northwest China. *Sustainability*. 2018. Vol. 10. Issue 3. 22 p. DOI:10.3390/su10030656.
8. Аверьянов С. Ф. Борьба с засолением орошаемых земель. Москва: Колос, 1978. 288 с.
9. Евграшкина Г. П. Влияние горнодобывающей промышленности на гидрогеологические и почвенно-мелиоративные условия территорий: монография. Днепропетровск: Монолит, 2003. 200 с.
10. Brenner H. The Diffusion Model of Longitudinal Mixing in Beds of Finite Length. Numerical values. *Chemical engineering Science*. 1962. Vol. 17. № 1. P. 229–243.
11. Веригин Н. Н., Васильев С. В., Саркисян В. С., Шержуков Б. С. Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод. Москва: Колос, 1979. 336 с.

References

1. Onoiyko, Y. Y. (2013). Halohennny grunty podyv mezhyrychchya Dnipro–Molochna. *Vysnyk Lvyyvskogo universitetu. Seriya geograpychna*. **46**, 284–291.
2. Yevdokimova, T. I., & Bykovskaya, T. K. (1985). Pochvy podovyh ponyzheni yuga Ukrayiny. Moskva. MGU.

3. Borodychev, V. V., Dedova, E. B., Sazanov, M. A., & Lytov, M. N. (2016). Modelyrovaniie processa upravleniia vodno-solevym rezymom pochv v usloviiah orosheniia. *Izvestiya Nyznevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka y vyssheie professionalnoye obrazovaniie*. **2**, 26–33.
4. Falkovych, A. S., & Pron'ko, N. A. (2002). Prognoz vodno-solevogo rezhyma pochvogruntov pry razrobotke proekta rekonstruktsii orositelnoy systemy i opredeleniie parametrov migratsii vlagi i solei. *Voprosy melioratsii i vodnogo hozyaystva Saratovskoiy oblasti*. Saratov: SGAU, pp. 23–33.
5. Nachshon, U. (2018). Cropland Soil Salinization and Associated Hydrology: Trends, Processes and Examples. *Water*. **10**, 21 p. DOI:10.3390/w10081030.
6. Bouksila F. et al. (2013). Assessment of Soil Salinization Risks under Irrigation with Brackish Water in Semiarid Tunisia. *Environmental and Experimental Botany*. **92**, 176–185. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.06.002
7. Seydehmet, J., Hui Lv, G., Nurmemet, I., Aishan, T., Abliz, A., Sawut, M., Abliz, A. & Eziz, M. (2018). Model Prediction of Secondary Soil Salinization in the Keriya Oasis, Northwest China. *Sustainability*. **10**, 3, 22 p. DOI:10.3390/su10030656.
8. Aver'yanov, S. F. (1978). *Bor'ba s zasoleniyem oroshaemyh zemel*. Moskva: Kolos.
9. Yevgrashkina, G. P. (2003). *Vliyanie gornodobyvayucshey promyshlennosty na hydroheologicheskiie I pochvenno-meliorativniie usloviia teritoriy: monographiia*. Dnepropetrovsk: Monolit.
10. Brenner, H. (1962). The Diffusion Model of Longitudinal Mixing in Beds of Finite Length. Numerical values. *Chemical engineering Science*. **17**, 1, 229–243
11. Verygyn, N. N., Vasylyev S. V., Sarkysyan V. S., & Sherzhukov B. S. (1979). *Metody prognoza solevogo rezhyma gruntov y gruntovyh vod*. Moskva: Kolos.

Евграшкина Галина Петровна – д.геол.н., профессор, профессор кафедры наук о Земле Днепрового национального университета им. О. Гончара, e-mail: ecohous@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0839-7068.

Харитонов Николай Николаевич – д.с.-х.н. профессор, профессор кафедры общего земледелия и почвоведения Днепрового государственного аграрно-экономического университета, e-mail: kharytonov.m.m@dsau.dp.ua, ORCID: 0000-0002-4650-5819.

УДК 539.3

Т.С. КАГАДІЙ, А.Г. ШПОРТА

НТУ «Дніпровська політехніка»

О.В. БІЛОВА

Національна металургійна академія України

І.В. ЩЕРБИНА

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ШАРУВАТОЇ ОСНОВИ З ПІДКРІПЛЮЮЧИМ ЕЛЕМЕНТОМ

Керування напружено-деформованим станом в'язкопружних тіл із циліндричною анізотропією, що складаються з багатьох шарів та армовані є дуже важливим на практиці, зокрема, у будівництві. Розв'язання задач механіки анкерних стрижнів та фундаментів на палях на сьогодні залишається дуже актуальним. Результати також можуть бути корисними при аналізі напружено-деформованого стану волокнистого композиту. У роботі розглядається складна просторова осесиметрична контактна задача про передачу навантаження від стержня кругового поперечного перерізу до в'язко-пружного тіла, що складається з двох скріплених між собою ортотропних шарів з циліндричною анізотропією. Визначається закон розподілу контактних напружень між стрингером та тілом, а також зусилля в стрингері при умові його навантаження в кінцевих точках поздовжніми силами. Для розв'язання використовується розроблений авторами асимптотичний метод. У якості малого параметра обирається відношення жорсткісних характеристик матеріалу. Оскільки матеріал тіла в'язкопружний, цей фізичний параметр включає в себе відношення функцій, що виникають після застосування перетворення Лапласа в основних рівняннях і залежать від параметру цього перетворення. Такі відношення для в'язкопружних анізотропних матеріалів, що зазвичай розглядаються на практиці, не перевищують одиницю і тому параметр асимптотичного інтегрування лишається малим. Такий вибір малого параметру є зручним, оскільки вигляд рівнянь та крайових умов, записаних відносно трансформант Лапласа, повністю співпадає з відповідними виразами для пружної постановки задачі. Після розв'язання задачі в такому вигляді, лишається питання переходу до оригіналів шуканих функцій. Такий перехід можна спростити, якщо знаходити оригінали для малих та великих значень обраних параметрів (наприклад, часу), а потім з'єднати їх за допомогою двоточнової апроксимації, що дозволяє отримати загальний розв'язок.

Ключові слова: асимптотичний метод, контактна задача, в'язкопружне тіло, композиційні матеріали, стрингер, ортотропні шари, циліндрична анізотропія.

Т.С. КАГАДІЙ, А.Г. ШПОРТА

НТУ «Днепровская политехника»

О.В. БЕЛОВА

Национальная металлургическая академия Украины

И.В.ЩЕРБИНА

Днепровский государственный аграрно-экономический университет

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СЛОИСТОГО ОСНОВАНИЯ С ПОДКРЕПЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Управление напряженно-деформированным состоянием вязкоупругих тел с цилиндрической анизотропией, которые состоят из многочисленных слоев и

подкреплены, является очень важным на практике, в частности, в строительстве. Решение задач механики анкерных стержней и свайных фундаментов на сегодня остается весьма актуальным. Результаты также могут быть полезными при анализе напряженно-деформированного состояния волокнистого композита. В работе рассматривается сложная пространственная осесимметричная контактная задача о передаче загрузки от стержня кругового поперечного сечения вязкоупругому телу, которое состоит из двух скрепленных между собой ортотропных слоёв с цилиндрической анизотропией. Определяется закон распределения контактных напряжений между стрингером и телом, а также усилия в стрингере при условии его нагружения в конечных точках продольными силами. Для решения используется разработанный авторами асимптотический метод. В качестве малого параметра выбирается отношение жесткостных характеристик материала. Поскольку материал тела вязкоупругий, этот физический параметр включает в себя отношение функций, которые возникают после применения преобразования Лапласа в основных уравнениях и зависят от параметра этого преобразования. Такие отношения для вязкоупругих анизотропных материалов, которые чаще всего встречаются на практике, не превышают единицу и поэтому параметр асимптотического интегрирования остается малым. Такой выбор малого параметра является удобным, поскольку вид уравнений и граничных условий, записанных относительно трансформант Лапласа, полностью совпадает с соответствующими выражениями для упругой постановки задачи. После решения задачи в таком виде остается вопрос перехода к оригиналам искомых функций. Такой переход можно упростить, если находить оригиналы для малых и больших значений выбранных параметров (например, времени), а затем срастить их с помощью двухточечной аппроксимации, что позволяет получить общее решение.

Ключевые слова: асимптотический метод, контактная задача, вязкоупругое тело, композиционные материалы, стрингер, ортотропные слои, цилиндрическая анизотропия.

T.S. KAGADIY, A.H. SHPORTA

National TU Dnipro Polytechnic

O.V. BILOVA,

National Metallurgical Academy of Ukraine

I.V. SCHERBINA

Dnipro State Agrarian and Economic University

STRESSED-STRAINED STATE OF A LAYERED BASIS WITH A FASTENING ELEMENT

The control of the stress-strain state of viscoelastic bodies with cylindrical anisotropy, which consist of numerous layers and are supported, is very important in practice, particularly in construction. The mechanics of anchor rods and pile foundations remains very important today. The results can also be useful for stress-strain analyses of fibrous composites. The paper deals with a complex spatial axisymmetric contact problem of transferring a load from a circular cross section rod to a viscoelastic body, which consists of two bonded orthotropic layers with cylindrical anisotropy. The law of the contact stress distribution between the stringer and the body, as well as the force in the stringer if it is loaded longitudinally at the end points, is determined. For a decision the asymptotic method worked out by authors is used. The relation of stiff descriptions of material gets out as a small parameter. As material of body вязкоупругий, this physical parameter is plugged in itself by the relation of functions that arise up after application of transformation of Laplace in basic

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.10

equalizations and depend on the parameter of this transformation. Such relations for viscoelastic anisotropic materials that mostly meet in practice do not exceed unit and parameter of asymptotic integration remains small. Such choice of small parameter is comfortable, as a type of equalizations and border terms, written in relation to the transforms of Laplace, fully coincides with corresponding expressions for the resilient raising of task. After the decision of task in such kind the question of passing a stay to the originals of the sought after functions. Such transition can be simplified, if to find originals for the small and large values of the chosen parameters (for example, to time), and then to join them by means of two-point approximation, that allows to get a common decision.

Keywords: asymptotic method, contact problem, viscoelastic body, composite materials, stringer, orthotropic layers, cylindrical anisotropy.

Постановка проблеми

Задачі про передачу навантаження від підкріплюючих елементів до тіл з різними властивостями безпосередньо відносяться до будівельної механіки. Якщо навантажений елемент - це стрижень, тоді можна розглядати деякі питання руйнування армованих волокнами композитів. В даній роботі постановка задачі ускладнюється врахуванням в'язкопружних властивостей матеріалу основи, що, крім того, складається з двох шарів. Аналітичні розв'язки для просторових задач такого типу майже не зустрічаються в літературі. Тому проведене дослідження є актуальним і може бути корисним при подальших чисельних розрахунках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методам розв'язання плоскої та осесиметричної контактних задач про передачу навантаження від штампів, накладок та інших підкріплюючих елементів до основ з різними властивостями присвячені статті багатьох вчених [1]. Ця проблема розглядалась в роботах В. М. Александрова, В. М. Калякіна, Б. І. Когана, Д. А. Пожарського, В. П. Потележка, А. П. Філіппова, І. І. Kalker. Розв'язок деяких мішаних задач теорії пружності для багатошарових основ пізніше отримали В. С. Нікішин і Г.С. Шапіро, А. Hanuska та В. Novotny. Для штампа довільної форми у плані, який тисне на багатошарову основу, метод визначення контактних тисків запропоновано А. К. Приварниковим та його учнями [2]. Метою досліджень останніх років є врахування складних властивостей матеріалів, що наближає математичну модель до реальних задач. Наприклад, в [3] запропоновано метод розв'язання задачі електро-в'язкопружності для багатозв'язних пластин. Методом малого параметра задача зведена до рекурентної послідовності задач електров'язкопружності, що розв'язуються з використанням комплексних потенціалів.

Мета дослідження

Розв'язання складної просторової задачі про передачу навантаження від пружного підкріплюючого елемента до в'язкопружної шаруватої основи.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо осесиметричну контактну задачу про передачу навантаження від стрижня кругового поперечного перерізу до в'язкопружного тіла, що складається з двох скріплених між собою ортотропних шарів з циліндричною анізотропією.

$$0 \leq z_1 \leq h_1, h_1 \leq z_2 \leq h_2, r \neq \infty, z_1 = z, z_2 = z - h_1.$$

Стержень розміщений перпендикулярно обмежуючим площинам, середня лінія

його співпадає з віссю Oz .

Потрібно визначити закон розподілу контактних напружень між стрингером та тілом, а також зусилля в стрингері при умові його навантаження в кінцевих точках поздовжніми силами $P_0^{(1)}$ та $P_0^{(2)}$ (індекси 1, 2 стосуються відповідних шарів; при кінцевих значеннях h_1, h_2 з умови рівноваги $P_0^{(1)} = P_0^{(2)}$). Оскільки в просторових задачах для тіл з включеннями модель одновимірного пружного включення разом з моделлю контакту по лінії не застосовується, припускається, що має місце модель одновимірного стержня в сполученні з моделлю контакту по циліндричній поверхні для основи.

Оскільки матеріал основи в'язкопружний з циліндричною анізотропією, а задача формулюється з урахуванням аксіальної симетрії навантаження, тоді тензор напружень та вектор переміщень не залежать від Q (rQz – циліндричні координати). В такому випадку задача розпадається на дві незалежні: задачу про деформацію, в якій відсутня одна компонента зміщень та задачу крутіння. Докладно розглядається перша з них. Після застосування перетворення Лапласа за часом до співвідношень між деформаціями та напруженнями, задача зводиться до інтегрування рівнянь рівноваги відносно трансформант [4,5] для кожного з шарів

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \varepsilon_1 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \varepsilon_1 m \frac{\partial^2 \varpi}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} &= 0, \\ \varepsilon_1 \frac{\partial^2 \varpi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \varpi}{\partial z^2} + \varepsilon_1 m \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial z} + \varepsilon_1 \frac{1}{r} \frac{\partial \varpi}{\partial r} + \varepsilon_1 m \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial z} &= 0, \\ \varepsilon_1 &= \varepsilon \Phi(p), \quad \varepsilon = G/E_1 \end{aligned} \quad (1)$$

при наступних крайових умовах

$$\begin{aligned} \sigma_{33} &= E_3 \left(\frac{\partial \varpi}{\partial z} + \nu_{31} \frac{\partial u}{\partial r} + \nu_{32} \frac{u}{r} \right), \quad \sigma_{13} = G \left(\frac{\partial \varpi}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad \sigma_{33} = \sigma_{13} = 0, \quad (z = 0, z = h_1 + h_2), \\ \varpi &= \varpi_c, \quad u = 0 \quad (r = a). \end{aligned}$$

При $z = h_1$ трансформанти переміщення шарів та напружень σ_{33}, σ_{13} в них рівні, на нескінченності всі функції дорівнюють нулю. Переміщення стержня ϖ_c задовольняє відношенням

$$\begin{aligned} E_c F_c d^2 \varpi_c / dz^2 &= q(z), \\ N &= E_c F_c d \varpi_c / dz = P_0, \quad (z = 0, z = h_1 + h_2). \end{aligned}$$

Тут u, ϖ – трансформанти компонент вектора переміщень відповідних шарів, E_1, E_2, E_3 (G) – аналоги модулів пружності (зсуву) матеріалів шарів з урахуванням функцій що додаються за рахунок в'язкопружності, $m = G + \nu_{13} E_1$. Величина ε_1 розглядається як «малий» параметр при асимптотичному інтегруванні системи (1). Він дійсно малий, оскільки ε – мала величина, а функція $\Phi(p)$ не перебільшує одиницю для різницевих ядер повзучості (P параметр перетворення Лапласа); $q(z) = -2\pi a \sigma_{13}(a, z)$ – зусилля контактної взаємодії між стержнем і шарами, a –

радіус стержня. Оскільки при $r = a$ трансформанта переміщення u та похідна $\partial u / \partial z$ дорівнюють нулю, тоді напруження $\sigma_{13}(a, z)$ повністю визначається лише функцією $\partial \varpi / \partial z$:

$$q(z) = -2\pi a G(\partial \varpi / \partial r) \Big|_{r=a}$$

Для визначення зусилля в стрингері та зусилля контактної взаємодії використовується запропонований авторами метод [4, 5]. Після розкладання напружено-деформованого стану на дві складові крайова задача зводиться до наступних:

для першого шару

$$E_3^{(1)} \frac{\partial^2 \varpi_1}{\partial z^2} + G^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \varpi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varpi_1}{\partial r} \right) = 0 \quad (2)$$

при $z = 0, \frac{\partial \varpi_1}{\partial z} = 0,$ при $z = h_1, \frac{\partial \varpi_1}{\partial z} = \frac{f(r)}{E_3^{(1)}},$ при $r = a, \varpi_1 = \varpi_c \left(\frac{\partial \varpi_1}{\partial z} \Big|_{r=a} = \frac{d\varpi_c}{dz} \right)$

$$E_c F_c \frac{d^2 \varpi_c}{dz^2} = -2\pi a G^{(1)} \frac{\partial \varpi_1}{\partial r} \Big|_{r=a}, \quad (3)$$

при $z = 0, \frac{d\varpi_c}{dz} = \frac{P_0^{(1)}}{E_c F_c},$ при $z = h_1, \frac{d\varpi_c}{dz} = \frac{\partial \omega_1}{\partial z} \Big|_{r=a} = \frac{f(a)}{E_3^{(1)}}.$

Та аналогічної для другого шару. Ще раз зауважимо, що запис рівнянь відносно трансформант співпадає з відповідними рівняннями для пружного середовища, оскільки додаткові функції, що виникають за рахунок в'язкопружності, внесені в коефіцієнти (сталі) в рівняннях. Після застосування до рівнянь (2), (3) косинус-перетворення Фур'є за координатою z з кінцевими границями отримаємо

$$\frac{d^2 \varpi_1^*}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varpi_1^*}{dr} - \varpi_1^2 \left(\frac{n\pi}{h_1} \right) \varpi_1^*(r, n) = -\frac{(-1)^n}{G^{(1)}} f(r), \quad (4)$$

$$E_c F_c \left(\frac{n\pi}{h_1} \right)^2 \varpi_1^*(a, n) = \frac{E_c F_c}{E^{(1)}} f(a) (-1)^n - p_0^{(1)} + 2\pi a G^{(1)} \frac{d\varpi_1^*}{dr} \Big|_{r=a} \quad (5)$$

$$\varpi_1^*(r, n) = \int_0^{h_1} \omega_1(r, z) \cos \frac{n\pi z}{h_1} dz, \quad \varpi_1^2 = E_3^{(1)} / G^{(1)}$$

Після застосування до рівняння (4) перетворень Вебера за координатою r з урахуванням крайових умов, отримаємо

$$\frac{2}{\pi} \varpi_1^*(a, n) - \lambda^2 W_1(\lambda, n) - \varpi_1^2 \left(\frac{n\pi}{h_1} \right) W_1(\lambda, n) = -\frac{(-1)^n}{G^{(1)}} F(\lambda), \quad F(\lambda) = \int_a^\infty f(r) r \phi \lambda(r) dr,$$

$$W_1(\lambda, n) = \int_a^\infty \varpi_1^*(r, n) r \phi \lambda(r) dr, \quad \phi_\lambda(r) = I_0(a\lambda) Y_0(\lambda r) - Y_0(a\lambda) I_0(\lambda r),$$

I_ν, Y_ν □ функції Бесселя першого та другого роду.

Після застосування оберненого перетворення Вебера та обчислення деяких інтегралів остається необхідність в оберненні трансформант Фур'є. Для цього 10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.10

застосовується теорема Діріхле [6]. В результаті маємо

$$\begin{aligned} \varpi_1(a, z) &= \frac{2h_1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{f(a)}{E_3^{(1)}} (-1)^n - \frac{P_0^{(1)}}{E_c F_c} + \frac{2\pi}{E_c F_c} (-1)^n A_1(n) \right) \times \frac{\cos n \frac{\pi z}{h_1}}{n(n + g_1 M_1(n))} \\ &\quad \frac{d\varpi_1}{dr} \Big|_{r=a} = \frac{2}{G^{(1)} a h_1} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n A_1(n) \cos n \frac{\pi z}{h_1} - \\ &\quad - \frac{2\varpi_1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{f(a)}{E_3^{(1)}} (-1)^n - \frac{P_0^{(1)}}{E_c F_c} + \frac{2\pi}{E_c F_c} (-1)^n A_1(n) \right) \times \frac{\cos n \frac{\pi z}{h_1}}{n M_1^{-1}(n) + g_1} \\ &\quad f(r) = \int_0^{\infty} (F(\lambda) \phi_{\lambda}(r) \lambda d\lambda) / (J_0^2(a\lambda) + Y_0^2(a\lambda)). \end{aligned}$$

Для другого шару розв'язання проводиться аналогічно з урахуванням заміни змінної $z - h_1 = \xi$ в рівняннях (3) □(4).

Після оцінки низки інтегралів за допомогою теореми про середнє значення та врахування крайових умов знаходимо шукані функції та їх похідні для двох шарів

$$\begin{aligned} w_1(a, z) &= \frac{2h_1}{\pi^2} \frac{f(a)}{E_3^{(1)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cos n \frac{\pi z}{h_1}}{n(n + g_1 M_1(n))} - \frac{2h_1}{\pi^2} \frac{P_0^{(1)}}{E_c F_c} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n \frac{\pi z}{h_1}}{n(n + g_1 M_1(n))}, \\ w_2(a, \xi) &= \frac{2h_2}{\pi^2} \frac{P_0^{(2)}}{E_c F_c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cos n \frac{\pi \xi}{h_2}}{n(n + g_2 M_2(n))} - \frac{2h_2}{\pi^2} \frac{f(a)}{E_3^{(2)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n \frac{\pi \xi}{h_2}}{n(n + g_2 M_2(n))}, \\ \frac{dw_1(a, z)}{dz} &= -\frac{2}{\pi} \frac{f(a)}{E_3^{(1)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \sin n \frac{\pi z}{h_1}}{n + g_1 M_1(n)} + \frac{2}{\pi} \frac{P_0^{(1)}}{E_c F_c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n \frac{\pi z}{h_1}}{n + g_1 M_1(n)}, \\ \frac{dw_2(a, \xi)}{dz} &= -\frac{2}{\pi} \frac{P_0^{(2)}}{E_c F_c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \sin n \frac{\pi \xi}{h_2}}{n + g_2 M_2(n)} + \frac{2}{\pi} \frac{f(a)}{E_3^{(2)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin n \frac{\pi \xi}{h_2}}{n + g_2 M_2(n)}, \\ \frac{\partial w_1}{\partial r} \Big|_{r=a} &= -\frac{2\omega_1}{\pi} \frac{f(a)}{E_3^{(1)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cos n \frac{\pi z}{h_1}}{n M_1^{-1}(n) + g_1} + \frac{2\omega_1}{\pi} \frac{P_0^{(1)}}{E_c F_c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n \frac{\pi z}{h_1}}{n M_1^{-1}(n) + g_1}, \\ \frac{\partial w_2}{\partial r} \Big|_{r=a} &= -\frac{2\omega_{21}}{\pi} \frac{P_0^{(2)}}{E_c F_c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \cos n \frac{\pi \xi}{h_2}}{n M_2^{-1}(n) + g_2} + \frac{2\omega_2}{\pi} \frac{f(a)}{E_3^{(2)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n \frac{\pi \xi}{h_2}}{n M_2^{-1}(n) + g_2}. \end{aligned}$$

Невідоме значення $f(a)$ знаходиться з умови $w_1(a, h_1) = w_2(a, 0)$.

$$f(a) = \frac{P_0^{(1)} E_3^{(1)}}{E_c F_c} \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n(n+g_1 M_1(n))} + \frac{h_2 P_0^{(2)}}{h_1 P_0^{(1)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n(n+g_2 M_2(n))}}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+g_1 M_1(n))} + \frac{h_2}{h_1} + \frac{E_3^{(1)}}{E_3^{(2)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+g_2 M_2(n))}}$$

Зусилля в стрингері $N(z)$ та зусилля контактної взаємодії визначаються за формулами

$$N(z) = E_c F_c dw(a, z) / dz, q(z) = -2\pi\alpha G(\partial w / \partial r) \Big|_{r=a}$$

Якщо $h_2 = 0$, тоді приходимо до задачі про передачу навантаження від стержня до шару товщини h_1 . Якщо $h_2 = 0, h_1 \rightarrow \infty$, тоді отримаємо розв'язок задачі про передачу навантаження до ортотропного напівнескінченного в'язкопружного тіла. Такі граничні переходи дозволяють перевірити отримані запропонованим підходом результати, оскільки більш спрощені варіанти задач розв'язані.

Обернене перетворення Лапласа визначає зусилля N та q в залежності від координати та часу. Для переходу до оригіналів зусилля представляють у вигляді рядів за малим параметром $\bar{\varepsilon}$, що залежить від p

$$N(z, p) = [N_0(z) + N_1(z)\bar{\varepsilon} + N_2(z)\bar{\varepsilon}^2 + \dots] / p,$$

$$q(z, p) = [q_0(z) + q_1(z)\bar{\varepsilon} + q_2(z)\bar{\varepsilon}^2 + \dots] / p.$$

Коефіцієнти вказаних розкладань простіше знаходити для «малих» та «великих» значень параметра. Такі граничні значення зусиль можна з'єднати за допомогою апроксиманти Паде [4,5], і таким чином, отримати розв'язки для всіх значень часу.

Наприклад, в задачі про передачу навантаження до півпростору, що має переважно зсувну повзучість при $p \rightarrow \infty, \bar{\varepsilon} = k / (p + \beta)$, при $p \rightarrow 0, \bar{\varepsilon} = \Delta p / (p + \beta), \Delta = -k / (\beta + k)$.

Оригінали функцій при малих значеннях часу мають вигляд

$$N(z, t) = N_0(z) + N_{10}(z) (k / \beta) (1 - e^{-\beta t}) + \dots,$$

$$q(z, t) = q_0(z) + q_{10}(z) (k / \beta) (1 - e^{-\beta t}) + \dots, \quad (6)$$

$$N_0(z) = \frac{2P_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin z s}{s + g_0 M_0(s)} ds,$$

$$N_{10}(z) = \frac{2P_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{g_0 a \omega_0 s [1 - M_0^2(s)] + 2g_0 M_0(s)}{2[s + g_0 M_0(s)]^2} \sin z s ds,$$

$$q_0(z) = \frac{2P_0g_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\cos z s}{g_0 + s M_0^{-1}(s)} ds, \quad (7)$$

$$q_{10}(z) = \frac{2P_0g_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{a\omega_0 s^2 [1 - M_0^{-2}(s)] - 2sM_0^{-1}(s)}{2[g_0 + sM_0^{-1}(s)]^2} \cos z s ds,$$

$$M_0(s) = K_1(a\omega_0 s) / K_0(a\omega_0 s).$$

При великих значеннях часу

$$\begin{aligned} N(z,t) &= N_{\infty}(z) + N_{1\infty}(z) \Delta e^{-\lambda t} + \dots, \\ q(z,t) &= q_{\infty}(z) + q_{1\infty}(z) \Delta e^{-\lambda t} + \dots \end{aligned}$$

Коефіцієнти розкладань знаходяться з (7) після заміни ω_0 на ω_{∞} , g_0 на g_{∞} , де $\omega_{\infty} = \omega_0 (1 + k / \beta)^{1/2}$, $g_{\infty} = g_0 (1 + k / \beta)^{-1/2}$.

Для цього ж випадку одна з апроксимант Паде (при обраних значеннях параметрів) має вигляд

$$N^* = \frac{0,915 - 0,11t - 1,31 e^{0,5t}}{1 - 0,134t - 1,55 e^{0,5t}}.$$

На рис. 1, 2 показані граничні значення $N^* = N / P_0$ та $q^* = q / P_0 g_0$ при $t \rightarrow 0$ (криві 1) та $t \rightarrow \infty$ (криві 2).

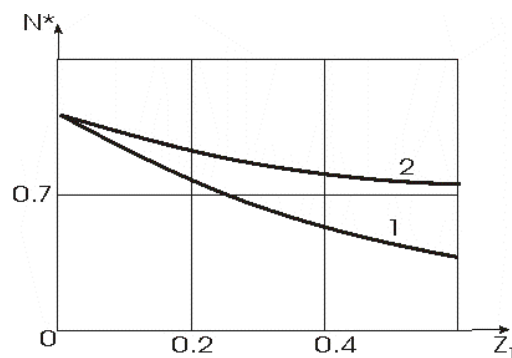


Рис. 1. Зміна зусиль у стержні.

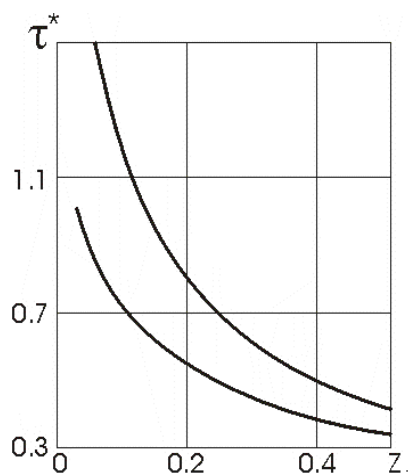


Рис. 2. Зміна зусилля контактної взаємодії.

Висновки

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості застосування розробленої методики розв'язання задач для чисельної реалізації при розрахунках, пов'язаних з проектуванням складних багат шарових конструкцій із сучасних композиційних матеріалів. Отримані розв'язки просторової контактної задачі можуть бути використані як еталонні для визначення меж вірогідності наближених методів розв'язання задач теорії пружності для багат шарових середовищ.

Список використаної літератури

1. Гузь А. Н., Бабич С. Ю., Рудницький В. Б. Контактное взаимодействие упругих тел с начальными (остаточными) напряжениями. Развитие идей Л. А. Галина в механике: монографія. Москва; Ижевск: Изд-во Ин-та компьютерных исследований, 2013. 480 с.
2. Приварников А. К., Спица О. Г. Осесимметричні контактні задачі для пружних багат шарових плит. *Вісник Донецького університету. Серія А. Природничі науки*. 2005. Вип. 1. С. 53–57.
3. Калоеров С. А., Самодуров А. А. Задача электровязкоупругости для многосвязных пластинок. *Математичні методи та фізико-механічні поля*. 2014. Т. 57. № 3. С. 62–77.
4. Кагадій Т. С. Метод возмущений в механике упругих (вязкоупругих) анизотропных и композиционных материалов: монографія. Днепропетровск: РИК НГА України, 1998. 260 с.
5. Кагадій Т. С., Білова О. В., Щербина І. В. Застосування методу малого параметру при моделюванні задач теорії в'язкопружності. *Вісник Херсонського національного університету*. 2019. 2(69). Ч.3. С. 69–76.
6. Кагадій Т. С. Передача нагрузки двуслойным телам конечных размеров. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Механіка*. 2000. Т. 2. Вип. 3. С. 38–46.

References

1. Guz, A. N., Babich, S. Yu., & Rudnitskiy, V. B. (2013). Kontaktnoe vzaimodeystvie uprugih tel s nachalnymi (ostatochnymi) napryazheniyami. Razvitie idey L. A. Galina v mehanike: monografIya. Moskva; Izhevsk: Izd-vo In-ta kompyuternyih issledovaniy.
2. Pryvarnykov, A. K., & Spysia, O. H. (2005). Osesymetrychni kontaktni zadachi dlia pruzhnykh bahatosharovykh plyt. *Visnyk Donetskoho universytetu. Seriiia A. Pryrodnychi nauky*. **1**, 53–57.

3. Kaloerov, S. A., & Samodurov, A. A. (2014). Zadacha elektroyazkouprugosti dlya mnogosvyaznyih plastinok. *Matematichni metodi ta fiziko-mehanichni polya*. 57, 3, 62–77.
4. Kagadiy, T. S. (1998). Metod vozmuscheniy v mehanike uprugih (vyazkouprugih) anizotropnyih i kompozitsionnyih materialov: monografiya. Dnepropetrovsk: RIK NGA Ukraini.
5. Kahadii, T. S., Bilova, O. V., & Shcherbyna, I. V. (2019). Zastosuvannia metodu maloho parametru pry modeliuvanni zadach teorii v'iazkopruzhnosti. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho universytetu*. 2(69), Part 3, 69–76.
6. Kagadiy, T. S. (2000). Peredacha nagruzki dvusloynnyim telam konechnyih razmerov. *Visnik Dnipropetrovskogo universitetu. Mehanika*. 2, 3, 38–46.

Кагадій Тетяна Станіславівна – д.ф.-м.н., професор, професор кафедри вищої математики, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: tkagadiy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6116-4971.

Шпорта Анна Григорівна – асистент кафедри вищої математики, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: shportaanna@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1260-7358.

Білова Оксана Вікторівна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики, Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна, e-mail: okbelova00@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6258-6164.

Щербина Ірина Володимирівна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики та фізики, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна, e-mail: sherbinaiv@ukr.net, ORCID:0000-0003-3968-4326.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗЛИТТЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ВИСОКОГО ПРОСТОРОВОГО РОЗРІЗНЕННЯ

Впродовж останніх років космічні знімальні системи стрімко розвиваються. На даний момент вони дозволяють отримувати дані з просторовим розрізненням півметра і менше для дослідження стану лісів, морських акваторій, шельфів тощо. Поява знімків високого просторового розрізнення вимагає застосування спеціальних методів їх обробки. Тому в даній роботі проведено аналіз ефективності відомих методів злиття супутникових знімків високого просторового розрізнення. Порівнюються методи: GIHS, Brovey, HPF, HCT, вейвлет-перетворення та комбінований HSV-HCT, з метою знаходження їх відмінностей та подальшого ефективного використання. Оцінка якості зображення відіграє важливу роль в обробці супутникових знімків, особливо при використанні методів підвищення інформативності зображень. Дослідження ефективності методів злиття відбувалися на первинних супутникових знімках високого просторового розрізнення WorldView-2. Одним із критеріїв перевірки спектральних властивостей синтезованих зображень є розрахунок спектрального індексу NDVI. Отриманні значення індексу NDVI для методів «Brovey» та HPF свідчать про колірні спотворення в порівнянні з еталонними даними. Це обумовлено тим, що методи «Brovey» та HPF засновані на злитті трьох каналних зображень та не враховують інформацію, яка міститься в ближньому інфрачервоному діапазоні. Порівняння кількісних показників (RMSE, ERGAS та NDVI) та візуальні результати показали перевагу комбінованого HSV-HCT методу. Це досягається, зокрема, за рахунок попередньої обробки первинних знімків, оброблення даних у локалізованих спектральних базисах, оптимізованого за інформаційними характеристиками, та використання інформації, яку містить зображення інфрачервоного діапазону. Тестування показали, що синтезоване зображення високого просторового розрізнення з максимальною інформативністю досягається при комплексному використанні методів злиття, що дозволяє підвищити просторову розрізненість багатоканального зображення без істотних колірних спотворень. Результати роботи можуть бути використані при подальшому розпізнаванні об'єктів та тематичній обробці знімків.

Ключові слова: злиття; гіперсферичне перетворення; супутникові знімки, високе просторове розрізнення; вейвлет-перетворення; нормалізований індекс вегетації.

V.J. KASHTAN, V.V. HNATUSHENKO

Dnipro University of Technology

AN INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF PAN-SHARPENING METHODS OF HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGES

In recent years, satellites imaging systems have been developing rapidly. Nowadays, these satellites allow to obtain data with a spatial resolution of half a meter or less to monitoring the state of forests, sea areas, shelves, etc. Images of high spatial resolution are required to use of special methods of their processing. Therefore, in this paper we analyze the effectiveness of the known methods of fusion high spatial resolution satellite images. The pan-sharpening methods under consideration were the GIHS, the Brovey, the HPF, the HCT, the

wavelet-transform and the combined HSV-HCT for conducts their detailed comparative analysis. Image quality assessment plays an important role in the processing of satellite images, especially when using methods to increase the information content of images. Experimental evaluation performed on eight-primary satellite images of high spatial resolution obtained WorldView-2 satellite. Quantitative characteristics of spectral properties of synthesized images were obtained by calculating the NDVI index. The NDVI index for the methods "Brovey" and HPF indicate color distortion in comparison with the reference data. This is due to the fact that the Brovey and HPF methods are based on the fusion of three channel images and do not include the information contained in the near infrared range. The quantitative (RMSE, ERGAS ma NDVI) and visual results show the superiority of the combined HSV-HCT method over the conventional and state-of-art image resolution enhancement techniques of high resolution satellite images. This is achieved, in particular, by preliminary processing of primary images, data processing localized spectral bases, optimized performance information, and the information contained in the infrared image. The experimental results show that a synthesized high spatial resolution image with high information content is achieved with the complex use of fusion methods, which makes it possible to increase the spatial resolution of the original multichannel image without color distortions.

Keywords: remote sensing; hyperspherical color transform; spatial images; high spatial resolution; wavelet decomposition; normalized difference vegetation index.

В.Ю. КАШТАН, В.В. ГНАТУШЕНКО

Национальный технический университет «Днепро́вская политехника»

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СЛИЯНИЯ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В последние годы космические съемочные системы стремительно развиваются. На данный момент они позволяют получать данные с пространственным разрешением полметра и меньше для исследования состояния лесов, морских акваторий, шельфов и тому подобное. Появление снимков высокого пространственного разрешения требует применения специальных методов их обработки. Поэтому в данной работе проведен анализ эффективности известных методов слияния спутниковых снимков высокого пространственного разрешения. Сравниваются методы: GIHS, Brovey, HPF, HCT, вейвлет-преобразования и комбинированный HSV-HCT, с целью нахождения их различий и дальнейшего эффективного использования. Оценка качества изображения играет важную роль в обработке спутниковых снимков, особенно при использовании методов повышения информативности изображений. Исследование эффективности методов слияния происходили на первичных спутниковых снимках высокого пространственного разрешения WorldView-2. Одним из критериев проверки спектральных свойств синтезированных изображений является расчет спектрального индекса NDVI. Полученные значения индекса NDVI для методов «Brovey» и HPF свидетельствуют о цветовых искажениях по сравнению с эталонными данными. Это обусловлено тем, что методы «Brovey» и HPF основаны на слиянии трех канальных изображений и не учитывают информацию, которая содержится в ближнем инфракрасном диапазоне. Сравнение количественных показателей (RMSE, ERGAS и NDVI) и визуальные результаты показали преимущество комбинированного HSV-HCT метода. Это достигается, в частности, за счет предварительной обработки первичных снимков, обработки данных в локализованных спектральных базисах, оптимизированной по информационным характеристикам, и использования информации, содержащейся в

ізображенні інфрачервоного діапазону. Тестування показали, що синтезоване зображення високого просторового розрешення з максимальною інформативністю досягається при комплексному використанні методів злиття, що дозволяє підвищити просторове розрешення вихідного багатоканального зображення без суттєвих кольорових искажень. Результати роботи можуть бути використані при подальшому розпізнаванні об'єктів і тематичній обробці знімків.

Ключевые слова: злиття; гіперсферическе преобразование; супутникові знімки; високе просторове розрешення; вейвлет-преобразование; нормалізований індекс вегетації

Постановка проблеми

Супутникові знімки високого просторового розрешення є одним із джерел геопросторової інформації. Однією із проблем використання супутникових знімків, одержаних різними космічними системами є спільна обробка багатоспектрального зображення (БЗ) з низьким просторовим розрешенням (канали: Coastal, Blue, Green, Yellow, Red, Red Edge, NIR1, NIR 2) та панхроматичного зображення (ПЗ) високого просторового розрешення, який є монохромним. ПЗ мають менший розмір пікселів і фіксуються у достатньо широкому спектральному діапазоні інтенсивності випромінення та мають суттєво вищу просторову розрізненість, ніж БЗ, отримані у вузьких спектральних інтервалах [1]. Сучасний рівень вимог до достовірності інтерпретації зображень зумовлює необхідність подолати фізичні обмеження доступних супутникових датчиків, зокрема, шляхом об'єднання в одному графічному об'єкті високих показників просторової та спектральної розрізненості.

Незважаючи на розроблені методи, призначені для поліпшення якості результуючого зображення, з'являються нові наукові проблеми, які пов'язані із підвищенням вимог до результатів обробки знімків високого просторового розрешення [2]. Більшість відомих методів розроблялися для об'єднання даних супутника SPOT, на відміну від якого довжина панхром-хвилі сучасних супутників (OrbView, Worldview-2,3 та ін.) була розширена від видимого до ближнього інфрачервоного діапазону. Так, на практиці основною проблемою, пов'язаною зі злиттям супутникових знімків високого просторового розрешення є поява кольорних спотворень, що знижують точність подальшого розпізнавання та аналізу БЗ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Протягом останніх двох десятиліть розроблено велику кількість методів злиття супутникових знімків, які можна розділити на: заміну компонентів, багатомасштабний аналіз та комбіновані методи [3–6]. Методи заміни компонентів – це перетворення БЗ із заміною деяких компонентів з ПЗ та перетворенні результату в первинний вид. IHS (intensity – яскравість, hue – кольорний тон, saturation – насиченість) – це метод, в якому замінюється I-компонент БЗ на ПЗ з високим просторовим розрешенням. Дане перетворення може бути застосовано тільки для трьох зображень; а для зображень з чотирма каналами застосовують модифікований метод GIHS [7–8]. Ефективним є алгоритм перетворення багатоспектрального зображення за допомогою метода аналізу незалежних компонент (PCA), в якому перший головний компонент (PC1) замінюється на зображення PAN [9]. Ще одними розповсюдженими методами заміни компонентів є перетворення Brovey Transform та Gram–Schmidt. Вони дозволяють одержати нове синтезоване зображення з хорошою візуальною якістю, але порушують спектральну якість [10–11]. Основним недоліком методів заміни компонентів є поява спектральних спотворень. Методи на основі багатомасштабного аналізу дозволяють отримати

зображення, які матимуть високе просторове розрізнення (завдяки ПЗ), високе спектральне розрізнення (завдяки БЗ) та міститимуть інформацію, відсутню у первинних даних (завдяки зображень, що отримані за допомогою мікрохвильової зйомки та активної локації). Прикладом таких методів є метод піраміди Лапласа [12] та методи на основі вейвлет-перетворення [13]. Вейвлет-перетворення дозволяють зберегти спектральну інформацію зображення, але не враховують апріорних і експертних відомостей.

Мета дослідження

Таким чином, виникає необхідність дослідження ефективності існуючих методів злиття супутникових знімків високого просторового розрізнення з отриманням кількісних критеріїв якості синтезованих зображень. Також, необхідно з'ясувати, які методи злиття зображень найменше порушують спектральну структуру каналів, для чого спробуємо використати вегетаційний індекс NDVI.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі було розроблено автоматизований алгоритм порівняння методів злиття супутникових знімків високого просторового розрізнення (рис. 1). Супутникові знімки, отримані супутником WorldView-2 (рис. 2), мають просторову роздільну здатність 1,84 м у мультиспектральному каналі та 46 см у панхроматичному каналі відповідно. Схема запропонованого алгоритму представлена на рис. 1 та складається з наступних основних етапів:

1. Попередня обробка знімка. На цьому етапі було виконано масштабування БЗ до розмірів панхроматичного зображення, та гістограмну еквалізацію багатоспектрального зображення. Це дозволило відкоригувати первинні зображення, вирівнявши інтегральні площі ділянок з різною яскравістю, запропонованим алгоритмом у роботі [14].

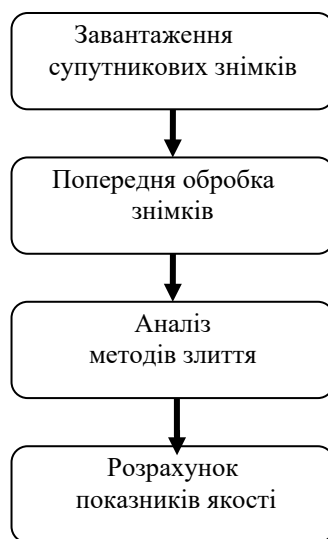


Рис. 1. Схема алгоритму.

2. Аналіз методів злиття. У запропонованому алгоритмі на даному етапі проаналізовано наступні методи: узагальнена інтенсивність – насиченість – тон, метод «Brovey», метод фільтра високих частот, вейвлет-перетворення та комбіновані методи. Ці методи є простими в обробці та можуть бути застосовані з будь-якою кількістю обраних вхідних спектральних каналів.

2.1. Метод узагальнена інтенсивність – насиченість – тон (GIHS) є модифікованим методом IHS, в якому можна вибирати кількість каналів. Канал I містить інформацію про яскравісну складову зображення, інші – відомості щодо спектральних складових. Метод можна представити згідно з наступними виразами [15]:

$$F_i = MS_{i\uparrow} + (P - S), \quad S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MS_{i\uparrow}, \quad (1)$$

де F_i – це i -й канал в зображенні після методу злиття, MS – багатоспектральне зображення, P – панхроматичне зображення, $MS_{i\uparrow}$ – i -й канал зображення MS після масштабування до розмірів P , S – синтезоване зображення, N – загальна кількість каналів MS .

2.2. Метод «Brovey». Цей метод, базується на формоутворенні нових спектральних складових БЗ відповідно з наступним виразом [16]:

$$F_i = \frac{P}{S} MS_{i\uparrow}, \quad S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N MS_{i\uparrow}, \quad (2)$$

де F_i – це i -й канал в зображенні після методу злиття, MS – багатоспектральне зображення, P – панхроматичне зображення, $MS_{i\uparrow}$ – i -й канал зображення MS після масштабування до розмірів P , S – синтезоване зображення, N – загальна кількість каналів MS .

2.3. Метод фільтра високої частоти (HPF) підвищує інформативність зображення на основі перенесення високочастотних складових панхроматичного каналу на спектральні канали відповідно з наступним виразом [17]:

$$F_i = \frac{[P * g] + MS_{i\uparrow}}{2}, \quad (3)$$

де F_i – це i -й канал в зображенні після методу злиття, MS – БЗ, P – ПЗ, $MS_{i\uparrow}$ – i -й канал зображення MS після масштабування до розмірів P , $*$ – оператор згортки, g – високочастотний фільтр.



Рис. 2 Еталонні знімки, отримані супутником WorldView-2: а) багатоканальне зображення; б) панхроматичне зображення.

2.4. Гіперсферичне конвертування (НСТ) – перетворення між власним колірним простором з декартовими координатами в гіперсферичний колірний простір, який ефективно працює з будь-якою кількістю вхідних каналів БЗ [18]:

$$F_i^2 = \sum_{i=1}^N MS_i^2, \quad P^2 = (Pan)^2, \quad (4)$$

де F_i – це i -й канал в зображенні після методу злиття, MS – багатоспектральне зображення, P – панхроматичне зображення, MS_i – i -й канал зображення MS , N – загальна кількість каналів MS .

2.5. Методи на основі вейвлет-перетворення реалізуються за допомогою згортки сигналу з декількома смуговими фільтрами та децимацією результату [19]. Для здійснення оберненої операції (синтезу), виконується операція інтерполяції субсмугових сигналів, фільтрація та їх додавання. При синтезі використовуються такі самі фільтри, що й при аналізі, однак коефіцієнти представлені в оберненому порядку:

$$F_i = MS_{i\uparrow} + \frac{MS_{i\uparrow}}{\sum_{i=1}^N MS_{i\uparrow}} \cdot P', \quad (5)$$

де F_i – це i -й канал в зображенні після методу злиття, MS – багатоспектральне зображення, P – панхроматичне зображення, $MS_{i\uparrow}$ – i -й канал зображення MS після масштабування до розмірів P , N – загальна кількість каналів MS , P' – деталізуючі коефіцієнти ПЗ. Панхроматичне зображення розкладається на деталізуючі коефіцієнти n -ого рівня, де $n = \log_2 r$ і r – це відношення розмірів БЗ до ПЗ.

2.6. Комбіновані методи дозволяють поєднати переваги існуючих методів злиття з мінімізацією колірних спотворень та з урахуванням фізичних механізмів фіксації видової інформації [5–6]. В роботі [14] запропоновано метод на основі HSV-перетворення, гіперсферичному конвертуванні і пакетного вейвлет-перетворення (HSV-НСТ), що дозволяє поліпшити просторову здатність первинного цифрового зображення й уникнути спектральних спотворень в локальних областях.

3. Наступним етапом є аналіз якісних та кількісних характеристик розглянутих у роботі методів злиття для супутникових знімків з метою визначення їх стану і значущості. Оцінка якості зображення відіграє важливу роль в обробці супутникових знімків, особливо при використанні методів підвищення якості зображень. Дослідження впливу методів злиття відбувалися на первинних супутникових знімках високого просторового розрізнення WorldView-2. Фрагменти панхроматичного та багатоспектрального знімків подано на рис. 2. Після злиття зображень за розглянутими вище методами були отримані зображення, які навіть візуально у порівнянні з еталонним БЗ відрізняються більшою чіткістю, але мають суттєві колірні спотворення (рис. 3). При цьому, у силу суб'єктивності людського сприйняття зорова система по різному сприймає артефакти на зображенні, багато залежить від досвіду експертів. Тому з метою визначення впливу кожного методу на якість багатоспектрального зображення у роботі проведено кількісний аналіз інформативності первинного та синтезованих БЗ, а саме знайдені середньоквадратична похибка ($RMSE$), відносна безрозмірна глобальна помилка ($ERGAS$) та нормалізований індекс вегетації ($NDVI$).

3.1. Критерій $RMSE$ визначає відхилення положення точки на знімку по відношенню до її положення у просторі [20].

3.2. *ERGAS* – це індекс якості, який обчислює «кількість» спектральних спотворень синтезованого зображення [20].

3.3. Одним із критеріїв перевірки спектральних властивостей синтезованих зображень є розрахунок спектрального індексу, зокрема було розраховано нормалізований індекс вегетації (*NDVI*) [21]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (7)$$

де *NIR* – значення інтенсивності світла у ближньому інфрачервоному діапазоні, *RED* – відбиття у червоній області спектра, що відповідає відповідно 8 каналу для знімків, отриманих супутником WorldView-2.



Рис. 3 Фрагменти зображень методами: а) «Brovey»; б) HPF; в) GHS; г) HCT; д) вейвлет-перетворення; е) HSV-HCT.

Отримані значення *RMSE*, *ERGAS* та *NDVI* для синтезованих багатоспектральних зображень представлені в таблиці 1. Бачимо, що комбінований метод (HSV-HCT) у порівнянні з класичними методами злиття дає більш якісний результат. На це вказує значення безрозмірної глобальної помилки *ERGAS*, що є найменшим (*ERGAS*=1,659) у порівнянні з існуючими методами і свідчить про мінімальну «кількість» спектральних спотворень супутникових знімків. Про ефективність комбінованого методу також свідчать отримані в таблиці 2 значення індексу *NDVI*. Отримані значення нормалізованого індексу вегетації для методів «Brovey» та HPF свідчать про колірні спотворення в порівнянні з еталонними даними. Це обумовлено тим, що методи «Brovey» та HPF засновані на злитті трьох каналних зображень та не враховують

інформацію, яка міститься в ближньому інфрачервоному діапазоні, що впливає на якість спектральної інформації синтезованого зображення.

Таблиця 1

Результати оцінки точності методів злиття за допомогою різних критеріїв

Метод	Значення RMSE	Значення ERGAS
GIHS	16.783	2.826
Brovey	20.637	4.639
HPF	15.637	4.849
НСТ	12.417	2.659
Вейвлет-перетворення	11.504	2.416
HSV-НСТ	9.739	1.659

Таблиця 2

Результати нормалізованого індексу вегетації

Зображення/ Метод	Метрика NDVI	Метрика NDVI для RMSE	Метрика NDV для ERGAS
Еталонне зображення супутника WorldView-2	1	0	0
GIHS	0.9614	0.0586	12.6028
Brovey	0.9725	0.2125	45.7155
HPF	0.9569	0.1526	32.8356
НСТ	0.9578	0.0578	12.4439
Вейвлет-перетворення	0.9573	0.0603	17.568
HSV-НСТ	0.9924	0.0533	11.4107

Висновки

В роботі проведено аналіз відомих методів злиття, зокрема GIHS, Brovey, HPF, НСТ, вейвлет-перетворення та комбінованого HSV-НСТ для супутникових знімків високого просторового розрізнення WorldView-2. Для експериментального дослідження «якості» (інформативності) синтезованих супутникових знімків з урахуванням їх спектральної інформації були розраховані критерії RMSE, ERGAS та NDVI. Результати за даними критеріями дозволяють встановити рейтинговий ряд методів злиття від найгіршого результату: Brovey, HPF, GIHS, вейвлет-перетворення, НСТ та комбінований метод HSV-НСТ. Крім того, окреме використання цих методів призводить до появи спектральних артефактів на синтезованому зображенні в порівнянні з еталонним. Тестування показали, що синтезоване зображення високого просторового розрізнення з максимальною інформативністю досягається при комплексному використанні методів злиття, що дозволяє підвищити просторову розрізненість багатоканального зображення без істотних кольорних спотворень. “Ідеальним” методом злиття є метод, який підвищує просторове розрізнення з мінімізацією викривлення кольору.

Список використаної літератури

1. Zhang Y. Understanding Image Fusion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2004. Vol. 70. № 6. P. 657–661.
2. Hordiiuk D. M., Hnatushenko V. V. Neural Network and Local Laplace Filter Methods Applied to Very High Resolution Remote Sensing Imagery in Urban Damage Detection. *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and*

- Engineering (YSF)*, (Lviv, October 17-20, 2017). P. 363–366. DOI: 10.1109/YSF.2017.8126648.
3. Basaeed E., Bhaskar H., Al-Mualla M. Beyond Pan-Sharpener: Pixel-Level Fusion in Remote Sensing Applications. *8th International Conference on Innovations in Information Technology (Innovations'12)*. (UAE, Al-Ain, March 18-20, 2012). P. 139–144.
 4. Amro J., Mateos M., Vega R., Molina A., Katsaggelos K. A Survey of Classical Methods and New Trends in Pansharpening of Multispectral Images. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2011. Article 79. 22 p.
 5. Kahtan V. Yu., Hnatushenko V. V. A Wavelet and HSV Pansharpening Technology of High Resolution Satellite Images. *Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS 2020)*: International Conference. (Ukraine, Khmelnytskyi, June 10-12, 2020). Khmelnytskyi, 2020. P. 67–76.
 6. Hnatushenko V., Hnatushenko Vik., Kavats O., Shevchenko V. Pansharpening Technology of High Resolution Multispectral and Panchromatic Satellite Images. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2015. Issue 4. P. 91–98.
 7. Rahmani S., Strait M., Merkurjev D., Moeller M., Wittman T. An Adaptive IHS Pan-Sharpener Method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2010. Vol. 7. Issue 4. P. 746–750.
 8. Tu T., Su S., Shyu H., Huang P. A New Look at IHS-Like Image Fusion Methods. *Information Fusion*. 2001. Vol. 2. № 3. P. 177–186.
 9. Ghassemian H. A Review of Remote Sensing Image Fusion Methods. *Information Fusion*. 2016. Vol. 32. P. 75–89. DOI:10.1016/j.inffus.2016.03.003.
 10. Wang Z., Ziou D., Li D., Li Q. A Comparative Analysis of Image Fusion Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. Vol. 43. № 6. P. 1391–1402.
 11. Zhang J. Multi-Source Remote Sensing Data Fusion: Status and Trends. *International Journal of Image and Data Fusion*. 2010. Vol. 1. Issue 1. P. 5–24.
 12. Li X., Xu F., Lyu X., Tong Y., Chen Z., Li S., & Liu D. A Remote-Sensing Image Pan-Sharpener Method Based on Multi-Scale Channel Attention Residual Network. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 27163–27177. DOI:10.1109/access.2020.2971502.
 13. Aishwarya N., Abirami S., Amutha R. Multifocus Image Fusion Using Discrete Wavelet Transform and Sparse Representation. *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*: International Conference. (India, Chennai, March 23-25, 2016). Chennai, 2016. P. 2377–2382. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566567.
 14. Гнатушенко В. В., Шевченко В. Ю., Кавац О. О. Підвищення просторового розрізнення багатоканальних аерокосмічних зображень високого просторового розрізнення на основі гіперсферичного перетворення. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2015. № 1 (32). С. 73–79.
 15. Meinel G., Neubert M. A Comparison of Segmentation Programs for High Resolution Remote Sensing Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2014. Vol. 35. Part B. P. 1097–1105.
 16. Maglione P., Parente C., Vallario A. Pan-Sharpener Worldview-2: IHS, Brovey and Zhang Methods In Comparison. *International Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol. 8. Issue 2. P. 673–679.
 17. Gangkofner U. G., Pradhan P. S., Holcomb D. W. Optimizing the High-Pass Filter Addition Technique for Image Fusion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2008. Vol. 74. Issue 9. P. 1107–1118.

18. Li Xu, Mingyi He, Zhang Lei. Hyperspherical Color Transform Based Pansharpening Method for WorldView-2 Satellite Images. *Industrial Electronics and Applications: 8th IEEE Conference*. (Australia, Melbourne, June 19–21, 2013). Melbourne, 2013. P. 520–523. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566424.
19. Aishwarya N., Abirami S., Amutha R. Multifocus image fusion using Discrete Wavelet Transform and Sparse Representation. *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET 2016): International Conference*. (India, Chennai, March 23–25, 2016). Chennai, 2016. P. 2377–2382. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566567.
20. Chen S., Zhang R., Su H., Tian J., Xia J. Scaling-up transformation of multisensor images with multiple resolutions. *Sensors*. 2009. Issue 9. P. 1370–1381.
21. Dr. Mustafa, Mustafa T. Using Water Indices (ndwi, mndwi, ndmi, wri and awei) to Detect Physical and Chemical Parameters by Apply Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Research – GRANTHAALAYAH*. 2017. Vol. 5. Issue 10. P. 117–128. DOI: 10.5281/zenodo.1040209.

References

1. Zhang, Y. (2004). Understanding Image Fusion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. **70**, 6, 657–661.
2. Hordiiuk, D. M., & Hnatushenko, V. V. (2017). Neural Network and Local Laplace Filter Methods Applied to Very High Resolution Remote Sensing Imagery in Urban Damage Detection. *Proceedings of the 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)* (Lviv, October 17–20, 2017), pp. 363–366. DOI: 10.1109/YSF.2017.8126648.
3. Basaeed, E., Bhaskar, H., & Al-Mualla, M. (2012). Beyond Pan-Sharpener: Pixel-Level Fusion in Remote Sensing Applications. *Proceedings of the 8th International Conference on Innovations in Information Technology (Innovations'12)*. (UAE, Al-Ain, March 18–20, 2012), pp. 139–144.
4. Amro, J., Mateos, M., Vega, R., Molina, A., & Katsaggelos, K. (2011). A Survey of Classical Methods and New Trends in Pansharpening of Multispectral Images. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. **Article 79**, 22 p.
5. Kahtan ,V. Yu., & Hnatushenko, V. V. (2020). A Wavelet and HSV Pansharpening Technology of High Resolution Satellite Images. *Proceedings of the Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security (IntelITSIS 2020): International Conference*. (Ukraine, Khmelnytskyi, June 10–12, 2020). Khmelnytskyi, pp. 67–76.
6. Hnatushenko, V., & Hnatushenko, Vik., Kavats, O., Shevchenko, V. (2015). Pansharpening Technology of High Resolution Multispectral and Panchromatic Satellite Images. *Scientific Bulletin of National Mining University*. **4**, 91–98.
7. Rahmani, S., Strait, M., Merkurjev, D., Moeller, M., & Wittman, T. (2010). An Adaptive IHS Pan-Sharpener Method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. **7**, 4, 746–750.
8. Tu, T., Su, S., Shyu, H., & Huang, P. (2001). A New Look at IHS-Like Image Fusion Methods. *Information Fusion*. **2**, 3, 177–186.
9. Ghassemian, H. (2016). A Review of Remote Sensing Image Fusion Methods. *Information Fusion*. **32**, 75–89. DOI:10.1016/j.inffus.2016.03.003.
10. Wang, Z., Ziou, D., Li, D., & Li, Q. (2005). A Comparative Analysis of Image Fusion Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **43**, 6, 1391–1402.
11. Zhang, J. (2010). Multi-Source Remote Sensing Data Fusion: Status and Trends. *International Journal of Image and Data Fusion*. **1**, 1, 5–24.

12. Li, X., Xu, F., Lyu, X., Tong, Y., Chen, Z., Li, S., & Liu, D. (2020). A Remote-Sensing Image Pan-Sharpener Method Based on Multi-Scale Channel Attention Residual Network. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 27163–27177. DOI:10.1109/access.2020.2971502.
13. Aishwarya, N., Abirami, S., & Amutha, R. (2016). Multifocus Image Fusion Using Discrete Wavelet Transform and Sparse Representation. Proceedings of the *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*: International Conference. (India, Chennai, March 23-25, 2016). Chennai, pp. 2377–2382. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566567.
14. Hnatushenko, V. V., Shevchenko, V. Iu., & Kavats, O. O. (2015). Pidvyshchennia prostorovoho rozrznennia bahatokanalnykh aerokosmichnykh zobrazhen vysokoho prostorooho rozrznennia na osnovi hipersferychnoho peretvorennia. *Naukovyi zhurnal Zaporizkoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, radioelektronika, informatyka, upravlinnia, Zaporizhzhia*. 1, 32, 73-79.
15. Meinel, G., & Neubert, M. (2014). A Comparison of Segmentation Programs for High Resolution Remote Sensing Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 35, Part B, pp. 1097–1105.
16. Maglione, P., Parente, C., & Vallario, A. (2016). Pan-Sharpener Worldview-2: IHS, Brovey and Zhang Methods In Comparison. *International Journal of Engineering and Technology*. 8, 2, 673–679.
17. Gangkofner, U. G., Pradhan, P. S., & Holcomb, D. W. (2008). Optimizing the High-Pass Filter Addition Technique for Image Fusion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 74, 9, 1107–1118.
18. Li, Xu, Mingyi, He, & Zhang, Lei. (2013). Hyperspherical Color Transform Based Pansharpening Method for WorldView-2 Satellite Images. Proceedings of the *Industrial Electronics and Applications: 8th IEEE Conference*. (Australia, Melbourne, June 19–21, 2013). Melbourne, pp. 520–523. DOI: 10.1109/ICIEA.2013.6566424.
19. Aishwarya, N., Abirami, S., & Amutha, R. (2016). Multifocus image fusion using Discrete Wavelet Transform and Sparse Representation. Proceedings of the *Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET 2016)*: International Conference. (India, Chennai, March 23-25, 2016). Chennai, pp. 2377–2382. DOI: 10.1109/WiSPNET.2016.7566567.
20. Chen, S., Zhang, R., Su, H., Tian, J., & Xia, J. (2009). Scaling-up transformation of multisensor images with multiple resolutions. *Sensors*. 9, 1370–1381.
21. Dr. Mustafa, Mustafa T. (2017). Using Water Indices (ndwi, mndwi, ndmi, wri and awei) to Detect Physical and Chemical Parameters by Apply Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Research – GRANTHAALAYAH*. 2017. 5, 10, 117–128. DOI: 10.5281/zenodo.1040209.

Каштан Віта Юріївна – к.т.н, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро), e-mail: vitalionkaa@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0395-5895.

Гнатушенко Володимир Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро), e-mail: vvgnat@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3140-3788.

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ
ПОСАДКИ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН**

Стаття присвячена розгляду проблеми підвищення ефективності та безпеки заходу на посадку та посадки повітряних суден. Підвищення точності вимірювання відхилення повітряного судна від глісади посадки, а також, забезпечення вимірювання кутового положення повітряного судна та параметрів його руху в процесі посадки з високою точністю та чутливістю дозволить підвищити ефективність та безпеку посадки повітряних суден. В роботі проведений детальний аналіз основних систем посадки, які використовуються для посадки як пілотованих, так і безпілотних літальних апаратів. В результаті аналізу було виявлено, що більшість систем посадки забезпечують лише визначення положення повітряного судна відносно площини посадки та не забезпечують визначення його просторового положення в процесі заходу на посадку. Таким чином, для забезпечення підвищення безпеки та ефективності етапів заходу на посадку та посадки необхідно розробити нову систему посадки. Для вирішення поставленої проблеми в роботі запропонований поляриметричний принцип формування лінії глісади, а також модель поляриметричної системи посадки. Поляриметрична система посадки складається з курсового та глісадного каналів, кожний з яких містить двохканальний блок випромінювання та двоканальний блок вимірювання. Канали блоку випромінювання відрізняються азимутом площини поляризації випромінювання, а канали вимірювання – кутами установки діелектричних пластин в горизонтальній та вертикальній площинах. Запропонована система потенційно дозволяє визначати як навігаційні, так і пілотажні параметри польоту повітряного судна: кутове просторове положення та відхилення від траєкторії посадки – з високою точністю та чутливістю. Висока точність забезпечується за рахунок використання поляриметричного методу вимірювання, а висока чутливість – за рахунок використання модулятора в блоці вимірювання та компенсаційного методу проведення вимірювання. Також, в роботі приведений алгоритм роботи поляриметричної системи посадки та показано, що використання двохканального курсового та глісадного каналів поляриметричної системи посадки та приведеного алгоритму роботи дозволяє однозначно визначити кутові відхилення повітряного судна від лінії глісади та його кутове просторове положення в процесі заходу на посадку та при посадці. Результатом даної роботи є розробка математичної моделі поляриметричної системи посадки, яка може бути використана для подальшого моделювання роботи системи з метою визначення оптимальних параметрів її функціонування.

Ключові слова: глісада, ефективність посадки, кутове просторове положення, математичне моделювання, повітряні судна, поляриметрична система посадки, положення в просторі, траєкторія посадки.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

Статья посвящена рассмотрению проблемы повышения эффективности и безопасности захода на посадку и посадки воздушных судов. Повышение точности измерения отклонения воздушного судна от глиссады посадки, а также обеспечение измерения углового положения воздушного судна и параметров его движения в процессе посадки с высокой точностью и чувствительностью позволит повысить эффективность и безопасность посадки воздушных судов. В работе проведен детальный анализ основных систем посадки, которые используются для посадки как пилотируемых, так и беспилотных летательных аппаратов. В результате анализа было выявлено, что большинство систем посадки обеспечивают только определение положения воздушного судна относительно плоскости посадки и не обеспечивают определение его пространственного положения в процессе захода на посадку. Таким образом, для обеспечения повышения безопасности и эффективности этапов захода на посадку и посадки необходимо разработать новую систему посадки. Для решения поставленной проблемы в работе предложен поляриметрический принцип формирования линии глиссады, а также модель поляриметрической системы посадки. Поляриметрическая система посадки состоит из курсового и глиссадного каналов, каждый из которых содержит двухканальный блок излучения и двухканальный блок измерения. Каналы блока излучения отличаются азимутом плоскости поляризации излучения, а каналы измерения – углами установки диэлектрических пластин в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Предложенная система потенциально позволяет определять как навигационные, так и пилотажные параметры полета воздушного судна: угловое пространственное положение и отклонения от траектории посадки – с высокой точностью и чувствительностью. Высокая точность обеспечивается за счет использования поляриметрического метода измерения, а высокая чувствительность – за счет использования модулятора в блоке измерения и компенсационного метода проведения измерения. Также, в работе приведен алгоритм работы поляриметрической системы посадки и показано, что использование двухканального курсового и глиссадного каналов поляриметрической системы посадки и приведенного алгоритма работы позволяет однозначно определить угловые отклонения воздушного судна от линии глиссады и его угловое пространственное положение в процессе захода на посадку и посадки. Результатом данной работы является разработка математической модели поляриметрической системы посадки, которая может быть использована для дальнейшего моделирования работы системы с целью определения оптимальных параметров ее функционирования.

Ключевые слова: глиссада, эффективность посадки, угловое пространственное положение, математическое моделирование, воздушные суда, поляриметрическая система посадки, положение в пространстве, траектория посадки.

A.Ye. KLOCHAN
National Transport University

MATHEMATICAL MODEL OF THE AIRCRAFT'S POLARIMETRIC LANDING SYSTEM

The paper deals with the problem of increasing the efficiency and safety of the aircraft's approach and landing. Improving the accuracy of measuring the aircraft's deviation from the landing glide, as well as ensuring the measurement of the aircraft's attitude and the parameters of its movement during landing, with high accuracy and sensitivity will increase the efficiency and safety of aircraft landing. The paper provides a detailed analysis of the main landing systems, which use for landing both manned and unmanned aerial vehicles. As a

result of the analysis, it was found that most landing systems provide only the determination of the position of the aircraft relative to the landing plane and do not provide the determination of its attitude during the approach. Thus, to ensure the safety and efficiency of the approach and landing stages, it is necessary to develop a new landing system. To solve this problem, the paper proposes a polarimetric principle for forming a landing glide, as well as a model of a polarimetric landing system. The polarimetric landing system consists of course and glide channels, each of which contains a two-channel radiation unit and a two-channel measurement unit. The channels of the radiation unit differ in the polarization plane azimuth of the radiation, and the measurement channels differ in the installation angles of the dielectric plates in the horizontal and vertical planes. The proposed system potentially allows us to determine both navigation and piloting aircraft's parameters: angular spatial position and deviation from the landing trajectory, with high accuracy and sensitivity. High accuracy is ensured by using a polarimetric measurement method, and high sensitivity - by using a modulator in the measurement unit and the compensation method of measurement. Also, the algorithm of the polarimetric landing system is given and it is shown that the use of two-channel course and glide channels of the polarimetric landing system and the given algorithm allows to unambiguously determine the angular deviations of the aircraft from the glide path and its angular spatial position during approach and landing. The result of this work is the development of a mathematical model of the polarimetric landing system, which can be used for further modeling of the system operation to determine the optimal parameters of its operation.

Keywords: landing glide, landing efficiency, attitude, mathematical modeling, aircraft, polarimetric landing system, position, landing trajectory.

Постановка проблеми

Авіаційна галузь, як України, так і світу характеризується динамічним розвитком та щорічним зростанням об'єму регулярних вантажних та пасажирських авіаційних перевезень. Так у 2018 році [1] зареєстроване зростання обсягу пасажирських перевезень на 6,4 %, а вантажних – на 2,4%. При цьому аналіз динаміки зростання обсягу авіаційних перевезень вказує на збереження даного тренду, як це показано на рис. 1. Це пов'язане, головним чином, з вдосконаленням авіатранспорту, підвищенням безпеки та ефективності його руху, а також з розвитком самої галузі авіаперевезень та авіатранспортної інфраструктури.

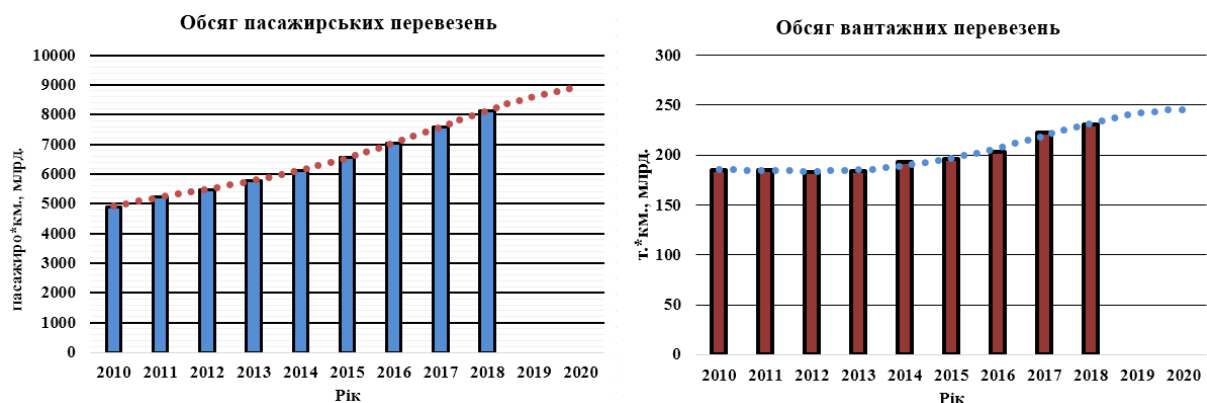


Рис. 1. Гістограми обсягів вантажних і пасажирських авіаційних перевезень з лініями тренду.

В останні роки знайшов широке застосування ще один напрямок авіації – безпілотні літальні апарати (БПЛА). Перевагами БПЛА перед пілотованою авіацією є висока мобільність; низька вартість використання; екологічність; легкість в

використанні та обслуговуванні та інші. При цьому спостерігається тенденція до подальшого розширення сфер застосування безпілотної авіації в найближчі роки.

Зростання обсягів авіаперевезень, широке впровадження БПЛА потенційно може призвести до зниження безпеки польотів, внаслідок збільшення щільності повітряних суден (ПС) в повітряному просторі та скорочення інтервалів часу між зльотами та посадками ПС. Згідно зі статистикою ІКАО за останні п'ять років [2] основними причинами виникнення авіаційних пригод є втрата керованості в польоті (LOC-I), зіткнення справного ПС з місцевістю в керованому польоті (CFIT) та безпека злітно-посадкової смуги (RS). LOC-I виникає в результаті часткової або повної втрати керованості літальним апаратом або відхилення від запланованого маршруту польоту. Основними причинами LOC-I є помилки пілота при керуванні, обмерзання, висока турбулентність повітряного середовища та інші. CFIT виникає в результаті зіткнення справного ПС з землею, водною поверхнею або нерухомою перепорою. До CFIT, як правило, відносяться авіаційні пригоди, коли пілоти до останнього не знають про наближення небезпеки. Основними причинами CFIT є помилки пілота, особливо в складних метеоумовах, несправність або нестійка робота навігаційного обладнання. RS включає викочування за межі злітно-посадкової смуги (ЗПС), великі швидкості заходу на посадку, нестабільний захід на посадку та посадка, недоліт до ЗПС та інші. Згідно зі статистикою компанії Boeing за останні 10 років [3] основними аварійними етапами є політ по маршруту, захід на посадку та посадка. Згідно з [4] статистика аварій та катастроф БПЛА має схожий характер зі статистикою аварій та катастроф пілотованих ПС. При цьому на етапі польоту по маршруту основними причинами виникнення авіаційних пригод є LOC-I та CFIT, а при заході на посадку та посадці – RS та CFIT. Однією з головних передумов до виникнення зазначених видів авіаційних пригод є помилки в визначенні пілотажно-навігаційних параметрів руху ПС.

Основними напрямками підвищення безпеки та ефективності польотів ПС є забезпечення всеосяжного аеронавігаційного забезпечення та підвищення точності витримування оптимальних параметрів польоту ПС під час посадки. Всеосяжне аеронавігаційне забезпечення дозволить зменшити кількість авіаційних пригод на етапі польоту по маршруту. Підвищення точності витримування оптимальних параметрів польоту ПС в заданих межах під час посадки: вертикальної та горизонтальної швидкостей, кутів відхилення від глісади та курсу, просторового положення та інших, дозволить підвищити безпеку та ефективність заходу на посадку та посадки ПС.

Згідно із [3] найбільш катастрофічними є два взаємопов'язані етапи польоту ПС: захід на посадку та посадка. На етапі заходу на посадку ПС переходить з польотної конфігурації до посадкової, а сам етап посадки є заключним етапом переходу в посадкову конфігурацію, який закінчується пробігом та повною зупинкою ПС. Таким чином, безпека та ефективність посадки ПС закладається та реалізується на етапі заходу на посадку. Сам процес заходу на посадку передбачає наступні процеси: вивід ПС на лінію курсу та гасіння поперечної швидкості; зниження повздовжньої швидкості руху ПС до допустимої посадкової швидкості; зниження висоти польоту за заданим профілем; утримування вертикальної швидкості зниження ПС в заданих межах; витримування кутового просторового положення ПС в заданих межах; вивід ПС в точку приземлення (точку дотику). Оптимальну лінію зниження ПС називають лінією глісади. Лінія глісади описує оптимальну висоту польоту ПС в залежності від відстані до оптимальної точки приземлення. Лінія глісади є променем, який виходить з оптимальної точки приземлення, належить площині курсу та нахилений до площини ЗПС під визначеним кутом нахилу глісади. При цьому кут нахилу глісади визначається з льотно-технічних характеристик ПС та характеристик аеродрому посадки. В сучасних системах посадки лінія глісади формується як лінія перетину площин курсу та глісади,

які формуються відповідними наземними засобами системи посадки. Посадка ПС по глісаді з витримуванням необхідної, в кожен момент посадки, горизонтальної та вертикальної швидкості польоту, а також, визначеного кутового просторового положення ПС забезпечує ефективну та безпечну посадку ПС.

В реальних польотах внаслідок нестабільності зовнішнього середовища та інерційності руху ПС відбувається відхилення ПС від лінії глісади та характеристик його польоту від оптимальних значень. Значні відхилення цих параметрів приводять до льотних пригод, які можуть привести до аварій та катастроф. Таким чином, в процесі заходу ПС на посадку виникає потреба в визначенні з високою точністю положення ПС відносно точки приземлення: відхилення по курсу та відхилення по глісаді; кутового просторового положення ПС: кутів крену, тангажу та рискання; параметрів руху ПС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

З метою підвищення безпеки та ефективності заходу ПС на посадку та посадки використовують різноманітні системи посадки (СП). Під системою посадки розуміють комплекс наземних та бортових технічних засобів, які забезпечують виведення ПС в зону посадки та управління процесом заходу на посадку. Задачею будь-якої системи посадки є безперервне та точне визначення просторового положення ПС та його відхилення від лінії глісади, а також дальності до точки приземлення. А метою застосування різних технічних засобів в системах посадки є створення умовних площин курсу та глісади з визначеним положенням у просторі. Кожна з систем посадки має свої переваги та особливості роботи, які визначають сферу їх застосування. Також, системи посадки діляться на інструментальні та візуальні. Інструментальні системи посадки передбачають виконання посадки відповідно до правил польоту за приладами, а візуальні системи посадки – відповідно до правил візуальних польотів. В свою чергу, в залежності від можливості наведення ПС в процесі посадки по висоті (по глісаді) системи посадки діляться на точні та неточні. При цьому точні забезпечують наведення ПС і по курсу і по глісаді, а неточні лише по курсу. У роботах [4]–[10] дана характеристика основних систем посадки ПС.

Спрощена система посадки (ССП) відноситься до інструментальних неточних СП та забезпечує категорію посадки CAT I. Робота ССП полягає в позначенні моменту прольоту маркерних маяків. При цьому, льотчик контролює висоту прольоту та здійснює доуправління ПС. До переваг ССП можна віднести можливість виведення на аеродром посадки ПС з найпростішим радіотехнічним обладнанням. До основних недоліків ССП можна віднести суб'єктивність в визначенні відхилень ПС від лінії глісади, неможливість визначити кутове просторове положення, забезпечення приладного зниження лише до висоти 50-80 м.

Радіолокаційна система посадки (РЛСП) відноситься до інструментальних точних СП. РЛСП забезпечує категорію посадки CAT I. Робота РЛСП полягає в визначенні положення ПС на екрані наземного посадкового радіолокатора та передачі екіпажу інформації про положення ПС за допомогою радіозв'язку [4]. До переваг РЛСП можна віднести можливість контролю положення ПС з землі. А до основних недоліків – високий вплив людського чинника, затримка в надходженні інформації до екіпажу, необхідність використання радіоканалу передачі інформації.

Інструментальна система посадки (ILS) відноситься до інструментальних точних СП та забезпечує категорію посадки від CAT I до CAT IIIВ. Робота ILS полягає в вимірюванні бортовим обладнанням сигналів від курсового та глісадного радіомаяків та визначенні на їх основі положення ПС відносно лінії глісади [5]. До переваг ILS можна віднести можливість проведення посадки як в директорному, так і в автоматичному режимах. До основних недоліків ILS можна віднести використання

радіохвиль метрового діапазону, які характеризуються інтерференцією від перешкод та нерівностей рельєфу; складність встановлення та використання наземного обладнання в аеропортах з обмеженою місцевістю: в горах, на узбережжях, з короткими ЗПС.

Система посадки на основі літакового відповідача (TLS) відноситься до точних інструментальних СП. Робота TLS полягає в визначенні просторового положення ПС відносно наземних датчиків та відстані до них на основі сигналів від літакового відповідача [6]. До переваг TLS можна віднести можливість використання в аеропортах з пересіченою та обмеженою місцевістю, можливість контролю посадки ПС з землі, відсутність необхідності встановлення додаткового бортового обладнання. До основних недоліків TLS можна віднести необхідність використання каналу передачі інформації від наземних датчиків на борт ПС, що призводить до затримки надходження інформації до екіпажу, складний алгоритм визначення положення ПС наземними датчиками.

Мікрохвильова система посадки (MLS) відноситься до інструментальних точних СП та забезпечує категорії посадки CAT III. Робота MLS схожа на роботу ILS: використовуються глісадний та курсовий радіомаяки, сигнали від яких приймаються бортовим обладнанням. В MLS використовуються хвилі сантиметрового діапазону з частотою 1–5 ГГц, які мають вузьку діаграму спрямованості і працюють в скануючому режимі [7]. До переваг даної системи відносять можливість забезпечувати посадку в кількох каналах, здатність задавати змінні схеми заходу на посадку та визначати відхилення ПС від оптимальної траєкторії не лише при посадці, а також при зльоті та уході на друге коло. Незважаючи на значні переваги, MLS не знайшла широкого застосування в цивільній авіації.

Оптичні системи посадки (ОСП) відносяться до інструментальних точних СП та мають широке застосування для БПЛА. Робота ОСП полягає в аналізі зображень наземних орієнтирів, отриманих за допомогою оптичних систем-камер. В залежності від методів обробки зображення розрізняють два основних види оптичних систем посадки: СП з використанням методів обробки зображення та СП з використанням методів обробки положення [8]. В СП з обробкою зображень відбувається визначення відносного положення ПС, шляхом вимірювання відносних координат візуальних орієнтирів та співставлення їх з необхідними. В СП з обробкою положення відбувається визначення просторового положення та позиції кількох камер, жорстко зв'язаних з ПС, відносно візуальних орієнтирів з відомими розмірами та координатами. До переваг ОСП можна віднести можливість визначення відносного кутового положення ПС відносно площини посадки, а до недоліків – необхідність точного калібрування камер, складні алгоритми обробки зображень, вплив погодних умов, необхідність наявності унікальних візуальних орієнтирів в зоні посадки.

Системи посадки з використанням супутникової навігаційної системи відносяться до інструментальних неточних СП. Їх робота полягає в побудові схеми посадки по визначеній кількості контрольних точок (пунктів маршрутів) з визначеними географічними координатами [9]. До переваг можна віднести відносну автономність, оскільки дана система не потребує встановлення додаткового обладнання в зоні посадки. До основних недоліків можна віднести необхідність використання систем функціональних доповнень для забезпечення необхідної точності, необхідність інтегрування бортової апаратури СНС в бортову обчислювальну систему управління польотом, необхідність видимості супутників.

Лазерна курсоглісда система посадки на ефекті розсіювання [10] відноситься до точних візуальних систем посадки. Її робота полягає у формуванні умовних площин курсу посадки та глісади зниження за допомогою лінійних орієнтирів в вигляді світлових променів, які жорстко зв'язані з ЗПС. До основних переваг СП даного типу

можна віднести раннє встановлення візуального контакту з ЗПС, скорочення часу оцінки просторового положення літака та створення умов для наглядного сприйняття зміщення ПС відносно лінії глісади. До недоліків СП даного типу можна віднести суб'єктивність в оцінці просторового положення ПС та його відхилення від лінії глісади, неможливість автоматизації та контролю за процесом посадки з землі.

Лазерну курсоглісадну систему посадки прямого бачення [10] можна віднести як до точних інструментальних, так і до точних візуальних СП. В СП даного типу глісада посадки формується за допомогою триколірової курсоглісади в вигляді просторово керованого світлового коридору. Також система забезпечує оптичну локацію ПС в кольорових зонах глісади. Лазерні курсоглісадні системи посадки прямого бачення в залежності від обладнання, що використовується, дозволяють забезпечити різні категорії посадки: від II до III категорії. До переваг СП даного типу можна віднести наступне: можливість цілодобового використання, висока контрастність, можливість автоматизації та контролю за процесом з землі. До недоліків СП даного типу можна віднести: необхідність використання каналу передачі інформації для формування сигналу про відхилення ПС, а також складна система встановлення наземних маяків.

Таким чином, основною задачею будь-якої системи посадки ПС є забезпечення точного виведення ПС в зону посадки з визначеними параметрами його руху та доуправління ПС в процесі заходу на посадку для забезпечення оптимальної траєкторії його зниження та посадки. Для цього, система посадки має забезпечувати вимірювання положення ПС та його просторового положення відносно площини посадки. Аналіз існуючих систем посадки показав, що більшість з них забезпечують лише визначення положення ПС відносно площини посадки та не забезпечують визначення його просторового положення в процесі заходу на посадку.

Мета дослідження

Розвиток авіаційної галузі, розширення обсягів авіаперевезень, розширення сфер застосування БПЛА веде до потенційного зниження безпеки та ефективності польотів ПС. При цьому одним з найнебезпечніших етапів польоту є посадка повітряного судна. Для підвищення безпеки та ефективності посадки використовуються системи посадки, які призначені для визначення положення ПС в процесі посадки та надання сигналів на доуправління ПС. На даний момент розроблено різноманітні системи посадки, які характеризуються власними перевагами та недоліками, які і визначають сферу їх застосування. Одними з найнебезпечніших факторів в процесі посадки є посадка з креном або тангажем, що призводить до зіткнення окремих частин ПС з поверхнею ЗПС, а також, недостатня точність витримування глісади посадки, що веде до недольоту чи перельоту ЗПС, що може призвести до зіткнення ПС з місцевістю та викочування ПС за межі ЗПС. Існуючі системи посадки характеризуються відносно високою точністю визначення положення ПС відносно глісади посадки, при цьому не забезпечують визначення кутового просторового положення ПС в процесі посадки. Таким чином постає питання в розробці системи посадки, яка б дозволила підвищити точність вимірювання відхилення ПС від глісади, а також, забезпечила вимірювання кутового положення ПС в процесі посадки з високою точністю та чутливістю. Ціллю даної роботи є розробка математичної моделі поляриметричної системи посадки ПС.

Викладення основного матеріалу дослідження

Оптичні та оптико-механічні методи вимірювання є одними з найточніших та використовуються в багатьох галузях науки та виробництва. Оптичні методи вимірювання характеризуються високою точністю та наочністю, а оптичні вимірювання відносяться до вимірювань найвищої точності. Одним з найточніших

оптичних методів вимірювання є поляриметричний метод вимірювання. Він характеризується вимірюванням поляризаційних характеристик випромінювання при взаємодії з досліджуваним об'єктом. При цьому використання компенсаційного методу проведення вимірювання дозволяє забезпечити високу чутливість. До основних переваг поляризаційних методів вимірювання можна віднести простоту та малі габарити вимірювальної системи, невисокі вимоги до якості оптичних деталей, окрім поляризаційних елементів. До основних недоліків поляризаційних методів вимірювання відноситься зміна параметрів поляризованого випромінювання в процесі заломлення та відбивання випромінювання елементами середовища розповсюдження. Застосування поляриметричного методу вимірювання для визначення положення ПС та його кутового просторового положення в процесі заходу на посадку можливе внаслідок використання діелектричної плоскопаралельної ізотропної пластини в оптичному каналі вимірювання. Діелектрична пластина забезпечує поворот площини поляризації відбитого та двічі заломленого променя, який пояснюється формулами Френеля. Залежність азимуту площини поляризації двічі заломленого променя від азимуту площини поляризації падаючого на пластину лінійно поляризованого випромінювання та його просторового кута падіння має наступний вид:

$$\varphi_d = \arctg(\cos^2(i - r) \cdot \tg(\varphi_e)) \quad (1)$$

де i – просторовий кут падіння лінійно поляризованого випромінювання, r – кут заломлення випромінювання, φ_e – азимут площини поляризації падаючого лінійно поляризованого випромінювання φ_d – азимут площини поляризації двічі заломленого випромінювання.

Розробка та створення поляриметричної системи посадки передбачає розробку та створення блоку випромінювання, який буде розміщуватись на поверхні площини посадки та буде формувати глісаду поляриметричної системи посадки, та блоку вимірювання, який буде розміщуватись на борту ПС та буде забезпечувати визначення пілотажно-навігаційних параметрів руху ПС в процесі його заходу на посадку. Схема формування глісади поляриметричної системи посадки приведена на рис. 2.

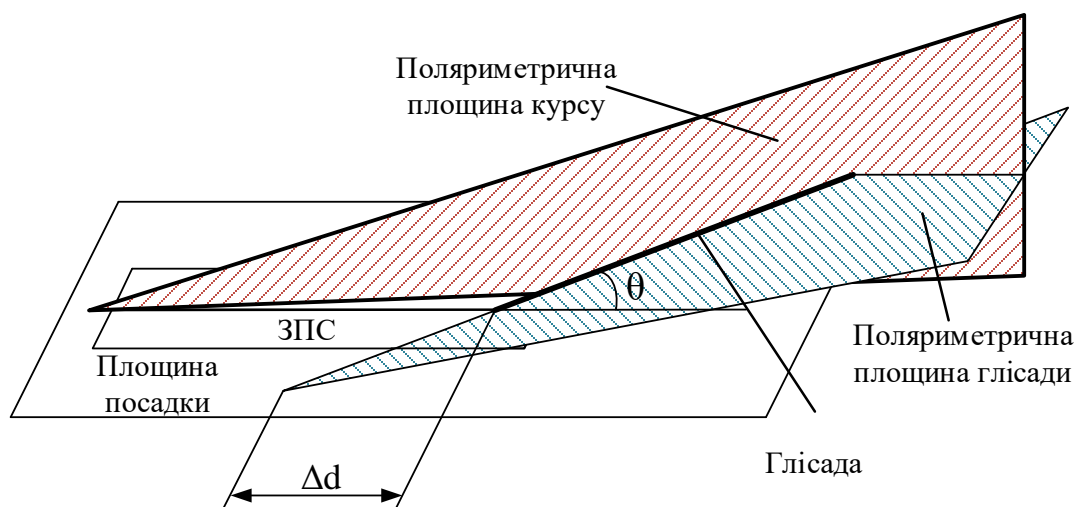


Рис. 2. Схема поляриметричного принципу формування глісади посадки.

Глісада поляриметричної системи посадки формується як лінія перетину поляриметричних площин курсу та глісади. Поляриметрична площина курсу

формується випромінювачем, який розміщений на лінії симетрії ЗПС, за її межами. Поляриметрична площина глісади формується випромінювачем, який розміщений збоку від ЗПС, за її межами на відстані Δd від точки оптимального приземлення. При цьому поляриметрична площина глісади формується в результаті розсіювання плоскополяризованого випромінювання в горизонтальній площині під кутом нахилу глісади з мінімальним кутом розходження в вертикальній площині. А поляриметрична площина курсу формується в результаті розсіювання плоскополяризованого випромінювання в вертикальній площині з мінімальним кутом розходження в горизонтальній площині. При цьому забезпечується поворот поляриметричної площини курсу навколо вертикальної осі, а поляриметричної площини глісади навколо поперечної осі з одночасним поворотом площини поляризації випромінювання. Це дозволяє однозначно зв'язати напрямок випромінювання з азимутом площини поляризації падаючого променя. Таким чином, глісада зниження характеризується «нульовим» азимутом площини поляризації падаючого випромінювання в курсовому та глісадному каналах. Відхилення ПС від глісади приводить до приймання бортовим обладнанням променів з відмінним від «нульового» азимутом площини поляризації та певним кутом падіння випромінювання в горизонтальній та вертикальній площинах. Визначення плоских кутів падіння променів в курсовому та глісадному каналах та їх азимуту площини поляризації дозволить однозначно визначити кутове просторове положення ПС та його відхилення від глісади посадки.

Поляриметрична система посадки ПС складається з двох каналів: курсового та глісадного, які мають ідентичну структуру. Блок схема такого каналу зображена на рис. 3. Один канал поляриметричної системи посадки складається з блоку випромінювання I та блоку вимірювання II. Блок випромінювання складається з двох каналів, азимуту площини поляризації яких відрізняються на визначену величину. Також забезпечується відставання напрямку випромінювання другого каналу від першого на визначену величину ΔT .

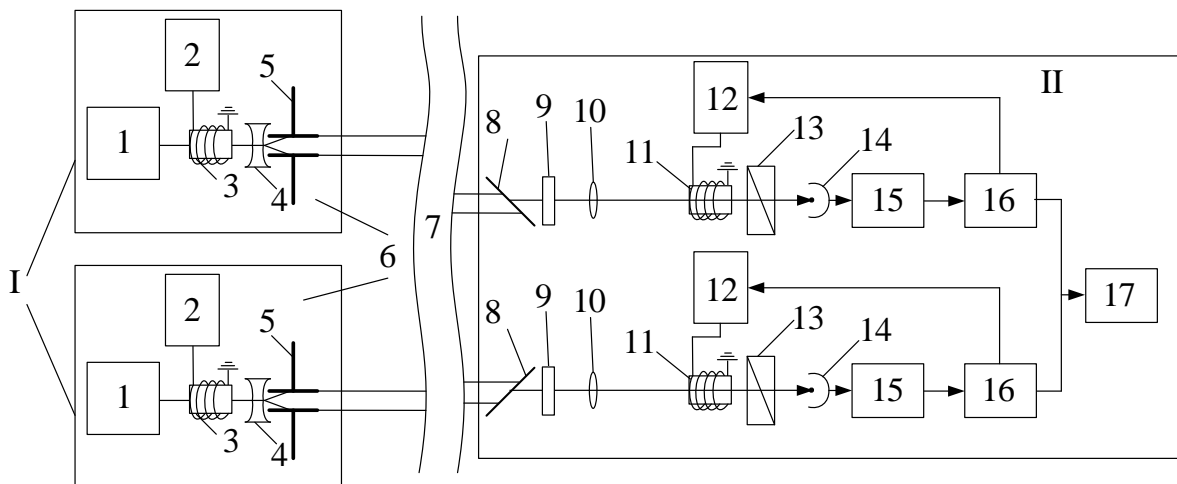


Рис. 3. Блок схема одного каналу роботи поляриметричної системи посадки

На рис. 4 зображена залежність азимуту площини поляризації випромінювання від напрямку випромінювання в першому та другому каналах та графік зміни напрямку випромінювання в першому та другому каналах у часі. Блок вимірювання влаштований таким чином, що здійснює вимірювання з певною дискретністю τ , яка на порядок менша від величини ΔT та здійснює програмний аналіз вимірюваних величин. Вимірювання в блоці вимірювання відбуваються безперервно з дискретним записом

даних для обчислень. Коли надходить перший «піковий» імпульс – він записується для обчислення, а сигнал, який надходить через проміжок часу ΔT – вважається сигналом від другого каналу блоку випромінювання. Блок вимірювання складається з двох ідентичних каналів, які відрізняються кутом установки діелектричної пластини.

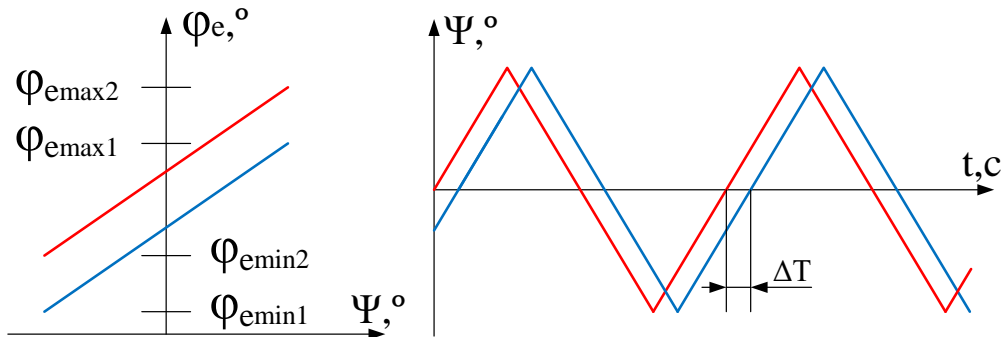


Рис. 4. Графіки залежності азимуту площини поляризації випромінювання від напрямку випромінювання та залежності напрямку випромінювання в часі в першому та другому каналах.

Опишемо принцип роботи одного каналу поляриметричної системи посадки. В кожному з каналів блоку випромінювання відбувається наступне. Джерело випромінювання 1 випромінює лінійно поляризований промінь визначеної довжини хвилі з визначеним азимутом площини поляризації, який проходить через комірку Фарадея 3. Комірка Фарадея забезпечує поворот площини поляризації променю відповідно до керуючих сигналів, які надходять від звукового генератора 2. Промінь після проходження комірки Фарадея проходить через розсіювальну лінзу 4 та щільну діафрагму 5, які забезпечують розсіювання лінійно поляризованого випромінювання з визначеними апертурами розсіювання в горизонтальній та вертикальній площинах. Кожний з двох каналів випромінювання розміщується на платформі 6, яка забезпечує поворот напрямку випромінювання відповідно до сигналу від звукового генератора 2. Це забезпечує однозначний зв'язок між напрямком випромінювання та азимутом площини поляризації променя, що випромінюється. Промінь проходить через середовище розповсюдження 7 та падає на діелектричні пластини 8 каналів блоку вимірювання. В кожному із каналів блоку вимірювання відбувається наступне. Після проходження пластин 8 двічі заломлений промінь проходить через оптичний фільтр 9 та фокусуючу лінзу 10 та фокусується на модулятор 11. Модулятор 11 здійснює модуляцію поляризованого випромінювання в змінному магнітному полі для підвищення чутливості вимірювання відповідно до керуючих сигналів, що надходять від звукового генератора 12. Після модулятора промінь надходить на аналізатор 13 та фотодетектор 14, де відбувається визначення азимуту площини поляризації двічі заломленого променя та перетворення його значення в електричний сигнал. Електричний сигнал після фотодетектора надходить в вузькосмуговий підсилювач 15, де відбувається його підсилення. Синхронний детектор 16 забезпечує компенсаційний метод проведення вимірювань та подає сигнал доуправління на звуковий генератор 12. Після синхронного детектора електричний сигнал надходить в обчислювальну систему 17, де відбуваються математичні обчислення та визначення пілотажно-навігаційних параметрів руху ПС в процесі його заходу на посадку.

Алгоритм роботи поляриметричної системи посадки.

Крок 1. Задати характеристики злітно-посадкової смуги (ЗПС), на яку відбувається посадка: кут нахилу глісади θ_0 та курс ЗПС ψ_0 .

Крок 2. Задати параметри роботи поляриметричної системи посадки: кути установки діелектричних пластин в горизонтальній та вертикальній площинах $i_{pl.h1}$, $i_{pl.h2}$, $i_{pl.v1}$, $i_{pl.v2}$; «нульовий» азимут площини поляризації випромінювання в курсовому та глісадному каналах φ_{0g} , φ_{0c} , показник заломлення матеріалу діелектричної пластини n та різницю азимутів площини поляризації падаючого променя в першому та другому каналах випромінювання δ .

Крок 3. Виміряти та передати в блок обчислення азимуту двічі заломлених променів першого (φ_{d0}) та другого (φ_{d1}) каналів блоку випромінювання для курсового та глісадного каналів у двох каналах вимірювання.

Крок 4. Визначити різницю (Δ) між азимутами двічі заломлених променів у першому та другому каналах блоку випромінювання: $\Delta = \varphi_{d1} - \varphi_{d0}$ для курсового та глісадного каналів в двох каналах вимірювання.

Крок 5. Визначити значення коефіцієнтів A для курсового та глісадного каналів у двох каналах вимірювання:

$$A = \frac{1 + \frac{\operatorname{tg} \Delta}{\operatorname{tg} \varphi_{d0}}}{1 - \operatorname{tg} \varphi_{d0} \operatorname{tg} \Delta}.$$

Крок 6. Визначити значення азимуту площини поляризації падаючого випромінювання (φ_{e1} та φ_{e2}) для курсового та глісадного каналів у двох каналах вимірювання:

$$\varphi_{e1} = \operatorname{arctg} \left(\frac{-(1-A) + \sqrt{(1-A)^2 - 4 \cdot A \cdot \operatorname{tg}^2 \delta}}{2 \cdot A \cdot \operatorname{tg} \delta} \right);$$

$$\varphi_{e1} = \operatorname{arctg} \left(\frac{-(1-A) - \sqrt{(1-A)^2 - 4 \cdot A \cdot \operatorname{tg}^2 \delta}}{2 \cdot A \cdot \operatorname{tg} \delta} \right).$$

Крок 7. Обрати в якості значення азимуту площини поляризації падаючого випромінювання з урахуванням наступної умови для курсового та глісадного каналів у двох каналах вимірювання:

$$\varphi_e = \begin{cases} \varphi_{e1} & \text{if} \left(\left| 1 - \frac{\operatorname{tg} \varphi_{d0}}{\operatorname{tg} \varphi_{e1}} \right| < \left| 1 - \frac{\operatorname{tg} \varphi_{d0}}{\operatorname{tg} \varphi_{e2}} \right| \& \frac{\operatorname{tg} \varphi_{d0}}{\operatorname{tg} \varphi_{e1}} < 1 \right) \\ \varphi_{e2} & \text{if} \left(\left| 1 - \frac{\operatorname{tg} \varphi_{d0}}{\operatorname{tg} \varphi_{e2}} \right| < \left| 1 - \frac{\operatorname{tg} \varphi_{d0}}{\operatorname{tg} \varphi_{e1}} \right| \& \frac{\operatorname{tg} \varphi_{d0}}{\operatorname{tg} \varphi_{e2}} < 1 \right) \end{cases}.$$

Крок 8. Визначити значення просторових кутів падіння випромінювання на діелектричну пластину (i_1 , i_2) для курсового та глісадного каналів у двох каналах вимірювання:

$$i_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{-\sin \left(\arccos \left(-\sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\varphi_d)}{\operatorname{tg}(\varphi_e)}} \right) \right) \cdot n}{n \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\varphi_d)}{\operatorname{tg}(\varphi_e)}} + 1} \right), \quad i_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin \left(\arccos \left(\sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\varphi_d)}{\operatorname{tg}(\varphi_e)}} \right) \right) \cdot n}{n \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\varphi_d)}{\operatorname{tg}(\varphi_e)}} - 1} \right).$$

Крок 9. Обрати значенням просторового кута падіння випромінювання на діелектричну пластину з урахуванням наступної умови для курсового та глісадного каналів у двох каналах вимірювання:

$$i = \begin{cases} i_1 & \text{if } (i_1 > 0 \ \& \ i_2 < 0) \\ i_2 & \text{if } (i_2 > 0 \ \& \ i_1 < 0) \end{cases}$$

Крок 10. Визначити плоскі кути падіння випромінювання на діелектричну пластину ($i_{h.g}$, $i_{v.g}$, $i_{h.c}$, $i_{v.c}$) для курсового та глісадного каналів, шляхом розв'язання наступної системи рівняння за допомогою метода Гаусса-Зейделя:

$$\begin{cases} i_h = \arctg \left(\sqrt{tg^2(i_1) - tg^2(i_v + i_{pl.v.1})} \right) - i_{pl.h.1} \\ i_v = \arctg \left(\sqrt{tg^2(i_2) - tg^2(i_g + i_{pl.g.2})} \right) - i_{pl.v.2} \end{cases},$$

де i_1 , i_2 – просторові кути падіння випромінювання в першому та другому каналах вимірювання, відповідно.

В результаті виконання кроків Крок 3 – Крок 10 відбувається визначення азимуту площини поляризації падаючого променя у двох глісадних каналах (φ_{e1g} , φ_{e2g}) та двох курсових каналах (φ_{e1k} , φ_{e2k}), плоских кутів падіння в горизонтальній та вертикальній площинах для курсового ($i_{h.k}$, $i_{v.k}$) та для глісадного ($i_{h.g}$, $i_{v.g}$) каналів вимірювання.

Крок 12. Визначити кутове положення ПС в процесі посадки: кут крену γ , кут тангажу ν , кут курсу ψ , кутове відхилення від лінії глісади по курсу $\Delta\psi$, кутове відхилення від лінії глісади по глісаді $\Delta\theta$:

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= \frac{\varphi_{e1k} - \varphi_{e2k}}{2}; \\ \Delta\theta &= \frac{\varphi_{e1g} - \varphi_{e2g}}{2}; \\ \gamma &= \frac{\varphi_{e1g} + \varphi_{e2g} + \varphi_{e1k} + \varphi_{e2k} - 2 \cdot \varphi_{0h} - 2 \cdot \varphi_{0k}}{4}; \\ \vartheta &= \Delta\theta + i_{h.h} + \theta_0; \\ \psi &= \Delta\psi + i_{v.k} + \psi_0. \end{aligned}$$

Дані про параметри руху ПС в процесі посадки, отримані в результаті роботи поляриметричної системи посадки надходять в систему управління ПС для здійснення директорного чи автоматичного управління з метою підвищення ефективності та безпеки посадки ПС.

Висновки

В роботі проведений аналіз існуючих системи посадки ПС та виявлено, що основним напрямком підвищення ефективності посадки ПС є підвищення точності вимірювання відхилення ПС від глісади, а також, забезпечення вимірювання кутового положення ПС в процесі посадки з високою точністю та чутливістю. Для вирішення даного питання в роботі запропонований поляриметричний принцип формування лінії глісади, а також модель поляриметричної системи посадки. Також, в роботі приведений

алгоритм роботи поляриметричної системи посадки. Запропонована система потенційно дозволяє визначати як навігаційні, так і пілотажні параметри польоту ПС: кутове просторове положення та відхилення від траєкторії посадки, з високою точністю та чутливістю. Визначення лінійних відхилень ПС від лінії глісади потребує вимірювання дальності до площини посадки та проведення додаткових розрахунків. Запропонована система посадки забезпечує високу точність вимірювання внаслідок використання поляриметричного методу вимірювання, а високу чутливість – внаслідок використання модулятора в блоці вимірювання та компенсаційного методу проведення вимірювання.

Результати даної роботи можуть бути застосовані при створенні та впровадженні поляриметричної системи посадки ПС. Теоретичним результатом даної роботи є розробка математичної моделі поляриметричної системи посадки, яка може бути використана для подальшого моделювання роботи системи з метою визначення оптимальних параметрів її роботи. Практичним результатом даної роботи може бути створення поляриметричної системи посадки. Створення поляриметричної системи посадки вимагає додаткових теоретичних та практичних досліджень. У статті відображений черговий теоретичний етап дослідження питання використання поляриметричних технологій вимірювання для створення високоефективної системи посадки повітряних суден.

Список використаної літератури

1. Annual Report of the ICAO Council: 2017: веб-сайт. URL: <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/default.aspx> (дата звернення 20.05.2020).
2. Accident Statistics: веб-сайт. URL: <https://www.icao.int/safety/iStars/Pages/Accident-Statistics.aspx> (дата звернення 20.05.2020)
3. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959-2018: веб-сайт. URL: http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf (дата звернення 20.05.2020)
4. Кащишин О. Л., Васюта К. С., Ківшар О. А., Долина М. П. Сучасний стан та перспективи розвитку радіолокаційних систем посадки. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. № 1(34). С. 39–45.
5. Instrument Landing System (ILS): веб-сайт. URL: [https://www.skybrary.aero/index.php/Instrument_Landing_System_\(ILS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Instrument_Landing_System_(ILS)) (дата звернення 20.05.2020).
6. Transponder Landing System: веб-сайт. URL: <http://www.anpc.com/transponder-landing-system/> (дата звернення 20.05.2020).
7. Principle of MLS Operation: веб-сайт. URL: <http://landingsystem.com/mls/principle-of-mls-operation/> (дата звернення 20.05.2020).
8. Gibert V., Burlion L., Chriette A., Boada J., Plestan F. A New Observer for Range Identification in Perspective Vision Systems. *Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control*. 2015. P. 401–412. DOI: 10.1007/978-3-319-17518-8_23
9. GBAS Landing System (GLS): веб-сайт. URL: [https://www.skybrary.aero/index.php/GBAS_Landing_System_\(GLS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/GBAS_Landing_System_(GLS)) (дата звернення 20.05.2020).
10. Олихов И., Столяров Г., Степанов В. Лазерные курсо-глиссадные системы посадки воздушных судов. *Электроника. Наука. Технология. Бизнес*. 2013. №5. С. 124–132. URL: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/3/article_3784_855.pdf (дата звернення 20.05.2020).

References

1. Annual Report of the ICAO Council: 2017: website. Retrieved from <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/default.aspx> (Access mode: 20.05.2020).
2. Accident Statistics: website. Retrieved from <https://www.icao.int/safety/iStars/Pages/Accident-Statistics.aspx> (Access mode: 20.05.2020).
3. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents. Worldwide Operations 1959-2018: website. Retrieved from http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf (Access mode: 20.05.2020).
4. Kashchyshyn, O. L., Vasiuta, K. S., Kivshar, O. A., & Dolyna, M. P. (2019). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku radiolokatsiinykh system posadky. *Nauka i tekhnika Povitrianykh syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 1(34), 39–45.
5. Instrument Landing System (ILS): веб-сайт. Retrieved from [https://www.skybrary.aero/index.php/Instrument_Landing_System_\(ILS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Instrument_Landing_System_(ILS)) (Access mode: 20.05.2020).
6. Transponder Landing System: веб-сайт. Retrieved from <http://www.anpc.com/transponder-landing-system/> (Access mode: 20.05.2020).
7. Principle of MLS Operation: website. Retrieved from <http://landingsystem.com/mls/principle-of-mls-operation/> (Access mode: 20.05.2020).
8. Gibert, V., Burlion, L., Chriette, A., Boada, J., & Plestan, F. A New Observer for Range Identification in Perspective Vision Systems. *Advances in Aerospace Guidance, Navigation and Control*. 2015. P. 401–412. DOI: 10.1007/978-3-319-17518-8_23
9. GBAS Landing System (GLS): website. Retrieved from [https://www.skybrary.aero/index.php/GBAS_Landing_System_\(GLS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/GBAS_Landing_System_(GLS)) (Access mode: 20.05.2020).
10. Olihov I., Stolyarov G., Stepanov V. Lazernyye kursoglissadnyie sistemi posadki vozdushnyih sudov. *Elektronika.Nauka. Tehnologiya. Biznes*, 2013, №5, S. 124 – 132. Retrieved from http://www.electronics.ru/files/article_pdf/3/article_3784_855.pdf (Access mode: 20.05.2020).

Клочан Арсен Євгенійович – аспірант кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспортного університету, e-mail: varsenchuk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4225-9382.

УДК 004.912

Є.Р. КОВИЛІН, О.С. ВОЛКОВСЬКИЙ
Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦІЇ ВІДПОВІДЕЙ У ПОШУКОВІЙ СИСТЕМІ НА ОСНОВІ НЕСТРУКТУРОВАНОЇ БАЗИ ЗНАНЬ

Метою роботи є розробка моделі системи запит-відповідь, що спроможна створювати конкретні текстові відповіді на запит користувача, використовуючи у своєму алгоритмі генерацію наукового тексту на природній мові. Система визначає смислові зв'язки в документах, створюючи при цьому новий текст, який містить відповідь на питання користувача. У статті розглядається модель системи, що базується на розробленому підході до формування семантичної моделі документа, який дозволяє отримувати кількісні показники семантичних властивостей документу на природній мові і сенсові зв'язки між компонентами тексту. Розроблена у вигляді прикладного програмного автомата, система семантичного пошуку має використовувати модель, спроможну працювати із достатньо формалізованим типом знань, а саме – науковим текстом і дозволяти автоматично формувати програмну семантичну модель як окремого документа, так і всього корпусу знань в цілому. На основі отриманої структури додаток має генерувати текстову відповідь на отриманий користувальницький запит. Це призводить до важливої наукової властивості створеної моделі – додаток повинен мати можливість використовувати нерозмічений заздалегідь корпус текстів, що являє собою неструктуровану базу знань, задля чого необхідно створити та дослідити семантичну модель наукового тексту на природній мові, а також розробити алгоритм її формування з семантичної мережі. Такий підхід вирішує більшість питань обробки тексту задля подальшої автоматичної генерації відповіді. Додатково розроблена підсистема автоматичної класифікації наукових текстів за ступенем їх зв'язності, що використовує у своїй роботі кількісні характеристики семантичних властивостей створеної моделі наукового тексту. У статті описані розроблені критерії оцінки створених систем та алгоритмів. Отримана таким чином система, окрім організації зручного пошукового середовища, утворює універсальну модель для проведення автоматичної обробки текстів на семантичному рівні для груп слов'яномовних текстів формального стилю, набір інструментів якої дозволяють гнучко створювати і оброблювати тематичні повнотекстові корпуси документів без попередньої семантичної розмітки та отримати програмну модель тексту формалізованої стильової спрямованості із кількісними характеристиками семантичних властивостей тексту, на основі яких можливо вирішувати інші завдання автоматичної обробки текстів.

Ключові слова: семантична мережа; автоматична обробка тексту; система запит-відповідь; генерація тексту.

Є.Р. КОВЫЛИН, О.С. ВОЛКОВСКИЙ
Днепроvский национальный университет им. Олеса Гончара

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ОТВЕТОВ В ПОИСКОВОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ

Целью работы является разработка модели запросно-ответной системы, способной создавать конкретные текстовые ответы на запрос пользователя, используя в своем алгоритме генерацию научного текста на естественном языке.

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.13

Система определяет смысловые связи в документах, создавая при этом новый текст, содержащий ответ на вопрос пользователя. В статье рассматривается модель системы, основанной на разработанном подходе к формированию семантической модели документа, который позволяет получать количественные показатели семантических свойств документа на естественном языке и смысловые связи между компонентами научного текста. Разработанная в виде прикладного программного автомата, система семантического поиска должна использовать модель, способную работать с достаточно формализованным типом знаний, а именно - научным текстом и позволять автоматически формировать программную семантическую модель как отдельного документа, так и всего корпуса знаний в целом. На основе полученной структуры приложение генерирует текстовый ответ на полученный пользовательский запрос. Это приводит к важному научному свойству созданной модели - приложение должно использовать неразмеченный заранее корпус текстов, который представляет собой неструктурированную базу знаний, для чего необходимо создать и исследовать семантическую модель научного текста на естественном языке, а также разработать алгоритм ее формирования из семантической сети. Такой подход решает большинство вопросов обработки текста для дальнейшей автоматической генерации ответа. Дополнительно разработана подсистема автоматической классификации научных текстов по степени их связности, использующая в своей работе количественные характеристики семантических свойств созданной модели научного текста. В статье описаны разработанные критерии оценки созданных моделей и алгоритмов. Полученная таким образом система, кроме организации удобной поисковой среды, образует универсальную модель для проведения автоматической обработки текстов на семантическом уровне для групп славяноязычных текстов формального стиля, набор инструментов которой позволяют гибко создавать и обрабатывать тематические полнотекстовые корпуса документов без предварительной семантической разметки и получить программную модель текста формализованной стилиевой направленности с количественными характеристиками семантических свойств текста, на основе которых возможно решать другие задачи автоматической обработки текстов.

Ключевые слова: семантическая сеть; автоматическая обработка текста; система запрос-ответ; генерация текста.

Y.R. KOVYLIN, O.S. VOLKOVSKY
Oles Gonchar Dnipro National University

COMPUTER MODEL OF RESPONSE GENERATION IN THE SEARCH SYSTEM BASED ON AN UNSTRUCTURED KNOWLEDGE BASE

The aim of the work is to develop a request-response system model capable of creating specific textual responses to a user's request, using a scientific text generating in a natural language in its algorithm. The system determines the semantic links in the documents, while creating a new text containing the answer to the user's question. The article discusses a model of a system based on the developed approach to the formation of a semantic model of a document, which allows you to get quantitative indicators of the semantic properties of a document in a natural language and semantic links between components of a scientific text. Developed as an application software, the semantic search system should use a model capable of working with a sufficiently formalized type of knowledge, namely - scientific text and allow you to automatically form a software semantic model of a single document and the body of knowledge as a whole. Based on the received structure, the application should

generate a text response to the received user request. This leads to an important scientific property of the created model - the application should be able to use unstructured corpus of texts, which is an unstructured knowledge base, for which it is necessary to create and explore a semantic model of scientific text in natural language, and develop an algorithm for its formation from the semantic network. This approach solves most word processing issues for further automatic generation. In addition, a subsystem for the automatic classification of scientific texts by the degree of their connectivity was developed, which uses quantitative characteristics of the created model of a scientific text in its work. The article describes the developed criteria for evaluating the created systems and algorithms. The system thus obtained, in addition to organizing a convenient search environment, forms a universal model for automatic text processing at a semantic level for groups of Slavic-language texts of a formal style, a set of tools that allow you to flexibly create and process thematic full-text document bodies without preliminary semantic markup and get a program text model formalized stylistic orientation with quantitative characteristics of semantic properties text and, on the basis of which it is possible to solve other problems of automatic word processing.

Keywords: semantic web; automatic text processing; request-response system; text generation.

Постановка проблеми

Проблема оптимального шляху пошуку інформації є однією з ключових в області комп'ютерної науки. Процес розробки більшості програмних продуктів рано чи пізно призводить до необхідності реалізації механізмів додавання, збереження і отримання інформації для її подальшої обробки. Ефективним і головним наразі рішенням є різноманітні системи баз даних, що прекрасно справляються з цими завданнями на програмному рівні. Однак, якщо в функціоналі системи присутня необхідність працювати безпосередньо з призначеним для користувача запитом, який часто складається з декількох неформальних критеріїв і вимагає певного семантичного аналізу, то обробка отриманих результатів повністю лягає на плечі користувача. Йдеться про підхід, який використовується у багатьох популярних web-пошукових системах: відповіддю на отриманий запит є множина ранжованих гіпертекстових документів (web-сторінок), що припускає подальший самостійний аналіз користувачем кожного документа для пошуку відповіді на своє питання. Головним мінусом такого підходу є відсутність глибокого семантичного розуміння вмісту документа, через що в отриманому масиві документів міститься велика кількість не пов'язаної із запитом користувача інформації, а також множини повторень однакової інформації, поданої в різних інтерпретаціях. Представлена робота присвячена розробки системи запит-відповідь, що спроможна створювати конкретні текстові відповіді на запит користувача, використовуючи у своєму алгоритмі генерацію тексту на природній мові. Особливістю процесу прикладної розробки таких систем є необхідність вирішення великої кількості наукових проблем галузі і залучення провідних інструментів штучного інтелекту для вирішення цільової задачі. Складності додає і сама структура мови – підходи, що використовуються для обробки однієї мови, можуть не спрацювати для іншої, наприклад через явище флексії (як для української та англійської мов). Головною ж проблемою є необхідність попереднього ручного опису семантичних онтологій між усіма елементами мови і між усіма документами в системі, що є важкою глобальною задачею галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведені дослідження існуючих розробок систем «запит-відповідь», що формують безпосередню відповідь на запит користувача, дозволяють виділити два

основних напрямів розробки таких систем - на основі лексико-семантичного словника відносин і на основі статистичного аналізу текстів. Представником першого напрямку є система [1], де семантичний аналіз полягає у виявленні взаємозв'язків між об'єктами (персоналіями, організаціями, подіями) і класифікації відносин між ними, а також ототожненні об'єктів із заздалегідь заданими семантичними класами, а другого напрямку - система [2], де для вхідного запиту складається "інформаційний портрет" - набір упорядкованих за значимістю ключових слів і словосполучень, характерних саме для даної вибірки текстів, після чого за набором ключових слів користувач може самостійно визначити теми, які можуть бути видані у відповідь на його запит, і тим самим уточнити потрібну йому тематику. Описані підходи не вирішують порушених в роботі проблем, оскільки мають на увазі залучення великої кількості ручної праці, як з боку користувача, при аналізі отриманих результатів, так і з боку розробника, при складанні попередньої семантичної розмітки, що суперечить поставленій в цій роботі меті.

Розроблена система базується на створенні семантичної моделі тексту, тому додатково було проведено аналіз основних підходів до комп'ютерного формування семантичних моделей тексту як для слов'янських, так і для англійської мов. Встановлено, що основою всіх цих підходів, що формують базові відносини між елементами в тексті, є продукційна модель онтологій. Практичне застосування цієї технології детально описано в роботі [3], на основі якої створюється семантичне уявлення метаописів тестового документа для подальшого семантичного пошуку. Важливою особливістю в рамках нашої роботи є те, що вихідні дані системи формуються на основі заздалегідь розміченого вручну корпусу мови. Цікавою практичною розробкою з використанням семантичних мереж є система формування семантичної мережі з слабоструктурованих текстових джерел, описана в роботі [4]. Автори роботи пропонують підхід для автоматичного відновлення структури розділів статті відкритого словника Wiktionary. Особливістю даного підходу є розробка деякої системи правил, на основі яких функціонує семантична програмна модель статті. Описані класи прикладних розробок комп'ютерних систем побудови семантичних мереж передбачають використання в якості вихідної бази знань деякий масив текстів, що містять попередню лінгвістичну розмітку, що, як було сказано вище, не задовольняє поставленій в роботі меті.

Мета дослідження

Рішення наукових проблем опису семантичних онтологій для корпусу наукових текстів на природній мові за допомогою розробки семантичної інтелектуальної системи запит-відповідь, що орієнтується під час своєї роботи на механізм генерації текстів. Система автоматично будує семантичну модель тексту, на основі якої визначає смислові зв'язки в документах, створюючи при цьому новий текст, який містить відповідь на питання користувача. Система не має використовувати у своїй роботі будь-які попередньо закладені семантичні знання про тексти, що оброблює.

Викладення основного матеріалу дослідження

Описана в цій статті модель є розвитком попередніх досліджень про побудову системи автоматичної генерації текстів на основі концепції моделі м'якого розуміння Леонтьєвої [5] та побудову семантичної моделі наукового тексту [6]. Розглянемо алгоритм роботи системи, що зображений на рис.1 та умовно поділений на п'ять основних кроків, більш детально.

Крок перший – отримання і обробка запиту користувача, що є типовою поведінкою систем запит-відповідь. У нашому випадку, під запитом розуміється набір

ключових слів, інформація про які цікавить користувача, розділених між собою знаками пробілу. Наприклад: «Класи програмування розробка»; «Космос комети»; «Телескопи»; «Теорія економіки». Форма та відмінок слів що складає запит не фіксовані, і може задаватися на бажання користувача. В цілому, система виходить з того, що семантична складова запиту є цільною і його частини не суперечать одна одному. Така форма запиту є відмінною від звичних морфологічно повних фраз, і була обрана для спрощення перевірки функціонування системи – аналіз повнотекстових запитів користувача є окремим семантико-морфологічним завданням і виходить за рамки цілей цієї роботи.

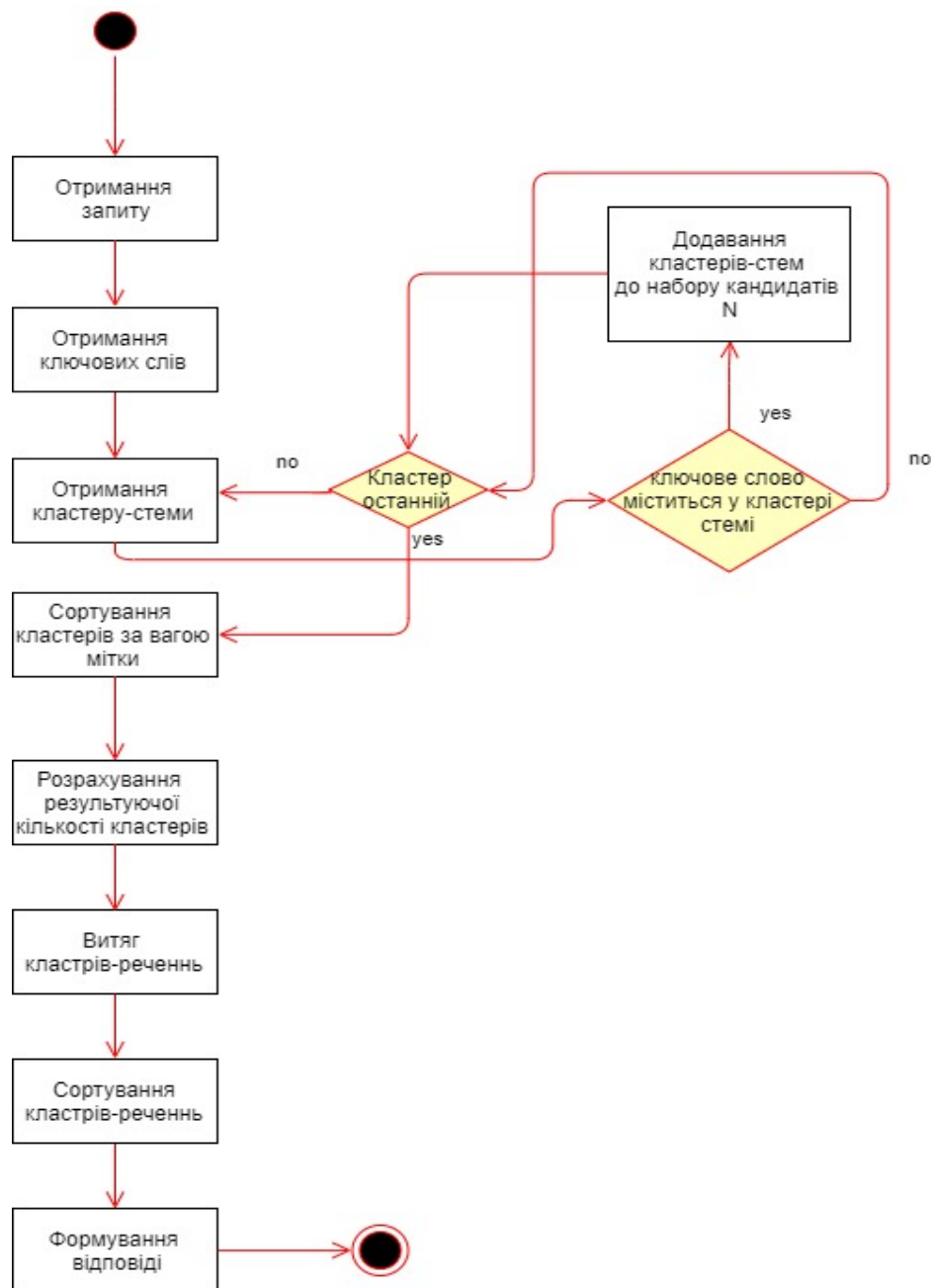


Рис. 1. Структура роботи системи запит-відповідь.

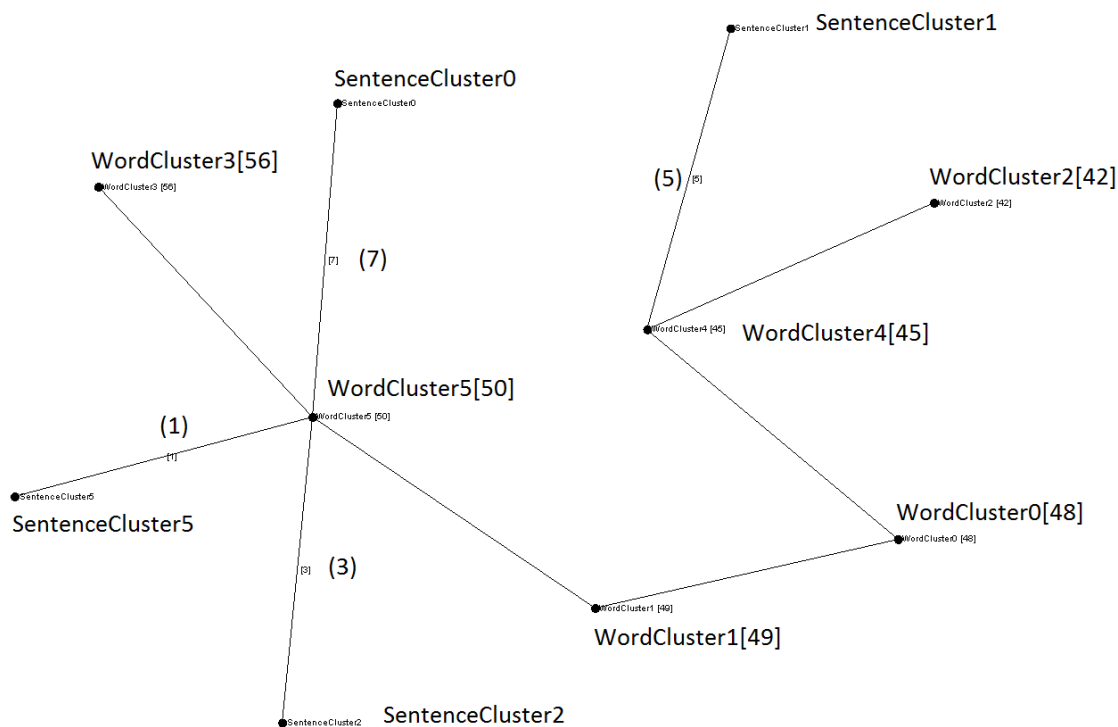


Рис. 2. Семантична мережа наукового тексту.

Крок другий – для кожного окремого ключового слова із запиту користувача відбувається операція пошуку відповідних кластерів-стем, множини яких формують семантичні мітки документа, за якими і буде генеруватися результуюча відповідь. Алгоритм побудови семантичної моделі документа і виділення кластерів-стем був описаний у роботі [6] і є інноваційною розробкою створеною в рамках цього дослідження. Його концепція представляє собою застосування латентно-семантичного аналізу та послідовності просторових операцій на двомірній площині для отримання семантичної структури наукового тексту, приклад якої зображено на рис.2.

Результуюча семантична мережа складеться із кластерів-слів (позначено на малюнку як WordCluster) до яких прив'язана вага кластера (зображена на малюнку у квадратних дужках), кластерів речень (позначено на малюнку як SentenceCluster) які пов'язані із кластерами-стемами семантичним відношенням, вага якого позначена у круглих дужках.

Отримана семантична мережа використовується для зняття числових даних, що характеризують семантичні властивості документа, до яких відносяться кількість стем-кластерів та кількість стем-речень, ваги кластерів-стем, ваги і кількість зв'язків, кількість стем що не увійшли до семантичної мережі, які використовуються для автоматизації процесів оцінки і фільтрації текстів за їх семантичною складовою. Головною властивістю створеної структури є те, що вона дозволяє встановити прямі відносини між кластерами-стемами і масивами речень, що і являє собою семантичне подання документу, без застосування попередньої семантичної розмітки або залучення попередніх семантичних знань.

Крок третій – для кожного кластера-стеми із семантичних моделей текстів проводиться перевірка входження його елементів в користувальницький запит, для чого використовується розроблений механізм визначення загальної частини на основі відстані Левенштейна [6], що застосовується для кожного ключового слова і кожної стеми у кластері. Якщо для поточного кластера-стеми таке входження знайдено - то

кластер стає кандидатом для включення у результуючу відповідь. Приклад кластеру-стеми тексту на тематику «чорні діри» зображено у таблиці 1.

Таблиця 1

Приклад фрагменту кластеру-стеми

диску середнемасивних стала аналог важливі витягнутої всередині тертя дозволило Зовнішні великих завершила стала вік тертя обсерваторія Через що з'єднують виявити з'єднують витягнутої забезпечує даними пророкує будова завершила забезпечує показана середнемасивних вік Альберта об'єкти назад тертя будова завершила рентгенівському речовини Метагалактики Сонця утворення подібних поглинає будова забезпечує Чумацького відстанях забезпечує область тертя астрономів білої будова тертя вік Альберта досліджень обсерваторія тертя обсерваторія тертя пророкує Альберта завершила нашої темпом багатьох спостерігача забезпечує становить інших сусідній стала компаньйоном Чорні вік Альберта масивних тертя десятків обсерваторія Виявлення тертя будова існування більш можливо відкрито скупчення визначаються завершила аналог високим тепер джерел

Як можна побачити з наведеного прикладу, у одному кластері містяться стеми, що мають прямий семантичний зв'язок, проте синтаксично вони ніяк не співвідносяться (чорні, обсерваторія, метагалактики, Сонця тощо). Саме це дає можливість системі знаходити семантично близькі речення у тексті, не спираючись при цьому на синтаксичні представлення (якщо ми шукаємо чорні діри – то інформацію про метагалактики також необхідно вважати релевантною, при умові достатньої сили семантичних зв'язків). Інші «нерелевантні» словоформи (наприклад – розповсюджені дієслова) відсікаються за недостатньою вагою відносно тексту в цілому і конкретного запиту. У цьому і полягає реалізація моделі м'якого розуміння Леонтьєвої, коли ситуація – а власне, запит користувача, змінює сенсові ваги одного і того самого тексту.

Важливо зазначити, що функціонування системи стає можливим, оскільки до її складу була включена база знань, що представляє собою корпус документів, тексти з якої мають відповідно побудовану семантичну модель документа. Корпус складається з декількох класів текстів, обробка яких по-перше повно покриває стилістичні і семантичні особливості мови, а по-друге стане опорою для проведення повноцінного тестування системи. Для цього була складена колекція із 100 текстів наукового стилю, розміри яких розподілені від 6 до 203 Кілобайт чистого тексту, класи яких розподілені у відсотковому співвідношенні у таблиці 2:

Таблиця 2

Відсоткове розподілення типів тексту у колекції

Тип	Кількість (%)
0	35
1	15
2	21
3	24
4	5

Де тип 0 – відповідає текстам із слабкою семантичною зв'язністю, що були створені за допомогою автоматичного генерування або складені із фрагментів різних текстів і використовуються для тестування системи, тип 1 – тексти на економічну тематику, тип 2 – тексти на тематику філософії, тип 3 – тести на тематику космології і астрономії, а тип 4 – тексти на тематику інформаційних технологій і програмування. Таке розподілення переслідує мету створення достатньо репрезентативної вибірки текстів та розробки необхідного набору даних, що дозволить створити гнучку систему оцінок та перевірок адекватності додатку. Велика кількість семантично помилкових текстів створює умови для виявлення випадковостей у створенні відповідей, а велика кількість тематично незалежних кластерів тексту дозволяє змодельовати можливості обробки запиту користувача у полістилістичній колекції текстів. Окрім того, у ході дослідження була перевірена адекватність побудови семантичної моделі документа, що

викладена у роботі [7] та заснована на оцінці сенсової місткості семантичних міток документу. Для цього, кожному документу із корпусу була побудована відповідна семантична модель тексту. Із кожної побудованої таким чином мережі були отримані кластери-стеми із найбільшою (семантично сильний кластер) та найменшою (семантично слабкий кластер) загальною вагою перетинів із семантичними контурами стем, для яких було розраховане значення сенсової місткості S_V за формулою (1)

$$S_V = \frac{N_Q}{N_W}, \quad (1)$$

де N_W – загальна кількість слів у документі, необхідна для нормалізації отриманих результатів, N_Q – встановлена емпірично кількість унікальних термінів у кластері, що мають пряме відношення до галузі знань, до якої належить текст (тематика документа). Отримані результати розрахунку сенсової місткості для кожного тематичного набору текстів зображені на рис.3.

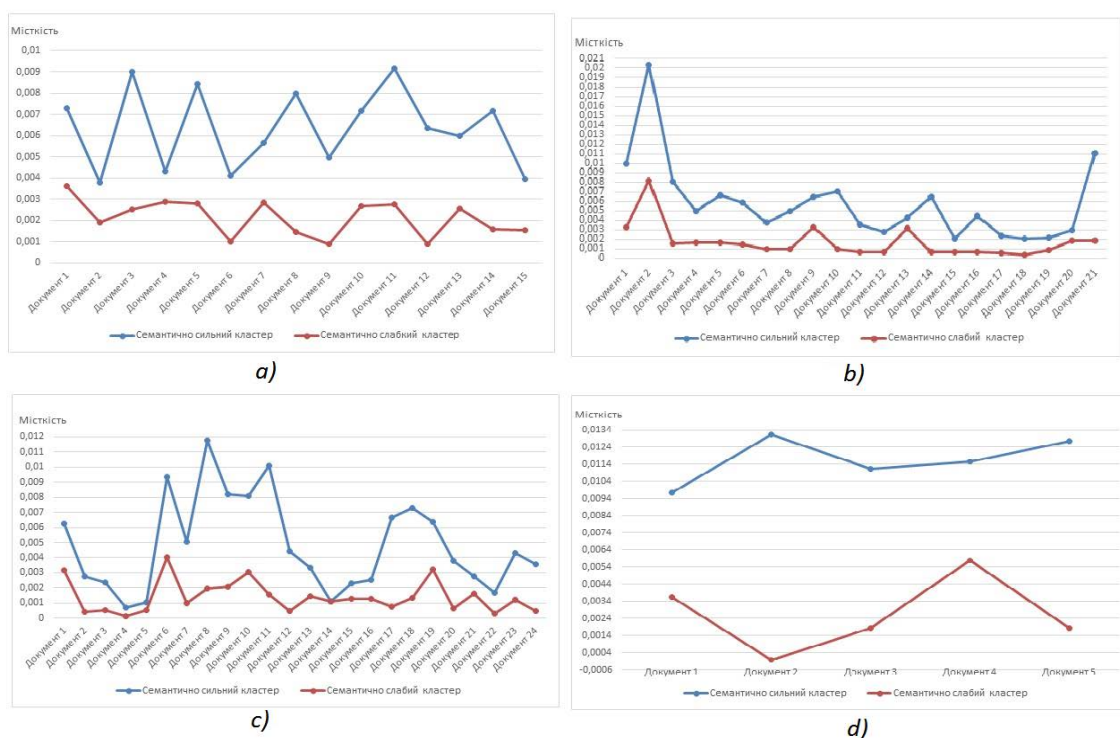


Рис. 3. Розподіл значень сенсової місткості за темами: а) економіка; б) філософія с) астрономія; д) інформаційні технології.

Отримані результати показали, що у проведених тестах кількість семантично значимих термінів у семантично сильних кластерах значно перевищує кількість термінів у семантично слабких кластерах незалежно від кількості, розміру та тематичної спрямованості документів – для тематики «економіка» (15 документів) кількість термінів у сильних кластерах у середньому у 2,98 рази більша ніж у слабких, для тематики філософія (21 документ) – у 3,375 рази, для тематики «астрономія» (24 документа) – у 3,473 рази, для тематики «інформаційні технології» (6 документів) - у 4,44 рази. При проведенні досліджень не враховувалась вага стем або їх будь-яке синтаксичне співвідношення із текстом – пов'язані терміни оцінювалися лише з точки зору належності до тематики документу, тому отримані результати вказують на цілком 10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.13

адекватне формування семантичних міток документу – кількість семантично значимих термінів у кластері-стемі прямо пропорційна до кількості та ваги пов'язаних із ним семантичних контурів речень у побудованих моделях документів, що доводить залежність структури семантичної мережі саме від семантичної складової тексту.

Крок четвертий – для подальшого аналізу система повинна ранжувати кластери-кандидати за їх співвідношенням із вхідним запитом, тому для кожного знайденого кластера-стеми розраховується ситуативна вага W_S – кількісна міра, що характеризує загальну вагу стем у тексті що збіглися із запитом користувача, після чого усі знайдені на попередньому кроці кластери-стеми сортуються відповідно до розрахованого значення ситуативної ваги. Для обмеження і зручності аналізу відповідей розмір результуючого тексту, що буде згенеровано для користувача, виходить із кількості кластерів із максимальною ситуативною вагою C_w , що вираховується за формулою (2):

$$C_w = \frac{W_c}{S_c}, \quad (2)$$

де W_c – загальна кількість стем у базі системи, S_c – загальна кількість речень у базі системи.

Заключний крок – генерація текстової відповіді користувачеві. Для цього вибираються кластери-речення, пов'язані з кожним кластером-стемою загальною кількістю C_w , що стали кандидатами для включення в результуючу відповідь на попередньому етапі. Якщо таких пов'язаних кластерів кілька, то в множину кандидатів потрапляє кластер з максимальною вагою зв'язку. В результаті даної операції формується множина речень-кандидатів для включення у результуючу відповідь, що сортується за номером речення у вихідному документі і загальною вагою стем у реченні. На виході користувач отримує згенеровану текстову відповідь, семантично пов'язану з вхідним запитом. Приклад отриманої відповіді на запит «інтерфейс» наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Приклад відповіді системи на запит «інтерфейс»

Інші абстрактні типи даних - метакласи, інтерфейси, структури, перерахування, - характеризуються якимись своїми, іншими особливостями. Поряд з поняттям «об'єкта» клас є ключовим поняттям в ООП (хоча існують і безкласового об'єктно-орієнтовані мови, наприклад, Self, Lua; докладніше дивіться прототипна програмування). Суть відмінності класів від інших абстрактних типів даних полягає в тому, що при завданні типу даних клас визначає одночасно як інтерфейс, так і реалізацію для всіх своїх екземплярів, а виклик методу-конструктора обов'язковий. На практиці об'єктно-орієнтоване програмування зводиться до створення певної кількості класів, включаючи інтерфейс і реалізацію, і подальшого їх використання. Використовувані логічною класифікації в зоології, ботаніці, хімії, деталях машин, несуть в собі основну ідею, що будь-яку річ завжди можна уявити окремим випадком деякого більш загального поняття. Саме тому приклади класів в навчальних посібниках з об'єктно-орієнтованого програмування так часто згадують яблука і груші. В об'єктно-орієнтованій програмі із застосуванням класів кожен об'єкт є «екземпляром» деякого конкретного класу, і інших об'єктів не передбачено. При цьому в різних мовах програмування допускається або не допускається існування ще якихось типів даних, екземпляри яких не є об'єктами (тобто мова визначає, чи є об'єктами такі речі, як числа, масиви і покажчики, або не є, і, відповідно, чи є такі класи як «число», «масив» або «покажчик», екземплярами яких були б кожне конкретне число, масив або покажчик). При використанні класів всі елементи коду програми, такі як змінні, константи, методи, процедури і функції, можуть належати (а в багатьох мовах повинні належати) того чи іншого класу. Метод, співвіднесений з екземпляром класу (звичайний метод), може бути викликаний тільки у самого об'єкта, і має доступ як до статичних полів класу, так і до звичайних полів конкретного об'єкта (при виклику цей об'єкт передається прихованим параметром методу). Успадкованих клас або інтерфейс буде містити в собі все, що зазначено для всіх його батьківських класів (в залежності від мови програмування і платформи, їх може бути від нуля до нескінченності). Часто різні змінні програми зберігають логічно пов'язані значення, і за підтримку цієї логічної зв'язності несе відповідальність програміст, тобто автоматично зв'язність не підтримує. Клас - це елемент ПО, що описує абстрактний тип даних і його часткову або повну реалізацію. Точний зміст цієї фрази буде розкритий нижче. Графічне представлення деякої кількості класів та зв'язків між ними називається діаграмою класів. Ідея класів прийшла з робіт по базам знань, що мають відношення до досліджень з штучного інтелекту. Тобто «екземпляр класу» в даному випадку означає не «приклад деякого класу» або «окремо взятий клас», а «об'єкт, типом якого є якийсь клас». Наприклад, абстрактний тип даних «рядок тексту» може бути оформлений у вигляді класу, і тоді всі рядки тексту в програмі будуть об'єктами - екземплярами класу «рядок тексту». Сам клас в підсумку визначається як список своїх членів, а саме полів (властивостей) і методів / функцій / процедур. Наприклад, загальна кількість

рядків тексту, створених в програмі за час її роботи, буде статичним полем класу «рядок тексту». В ООП при використанні класів весь виконуваний код програми (алгоритми) буде оформлятися у вигляді так званих «методів», «функцій» або «процедур», що відповідає звичайному структурному програмуванню, однак тепер вони можуть (а в багатьох мовах зобов'язані) належати тому чи іншому класу. Як і поля, код у вигляді методів / функцій / процедур, що належать класу, може бути віднесений або до самого класу, або до екземплярів класу. У програмуванні існує поняття програмного інтерфейсу, що означає перелік можливих обчислень, які може виконати та чи інша частина програми, включаючи опис того, які аргументи і в якому порядку потрібно передавати на вхід алгоритмам з цього переліку, а також що і в якому вигляді вони будуть повертати. Абстрактний тип даних інтерфейс придуманий для формалізованого опису такого переліку. Програмні інтерфейси, а також класи, можуть розширюватися шляхом успадкування, яке є одним з важливих засобів повторного використання готового коду в ООП. В об'єктно-орієнтованій програмі прапорець «звільнений» буде оголошений приватним членом деякого класу, а для читання і зміни його будуть написані відповідні публічні методи. Скрізь далі слова «клас», «об'єкт», «інтерфейс» і «структура» будуть вживатися в своїх спеціальних значеннях, заданих в рамках ООП

Отримана відповідь містить інформацію не тільки дані про інтерфейс що цікавить користувача, а й семантично пов'язану інформацію - щодо абстракцій у теорії програмування, об'єктно-орієнтованого підходу до розробки, інформацію про класи, тощо. Згенерований текст був отриманий на основі документів «Клас» і «Інтерфейс» із загального корпусу документів. Окрім того, алгоритм є стійким до кількості слів у запиті і їх семантичних зв'язків – у табл. 4 наведено приклад запиту що є комбінацією тематично однозначного (космос) і неоднозначного (дослідження) ключових слів.

Таблиця 4

Приклад відповіді системи на запит «дослідження космосу»

І нарешті, як і роль самої космонавтики для людства. Основним поштовхом до цього було протистояння двох наддержав (СРСР і США) - холодна війна. Початковий період обертання супутника навколо Землі склав 96,2 хв, а нахил - 65°1'. «Пальма першості» в області освоєння космосу дісталася СРСР, але США теж не хотіли відставати, і в такий подією світової важливості став політ на Місяць. Таким чином, «Луна-3» виявилася першим апаратом, який став штучним супутником відразу і для Землі, і для Місяця - його сильно витягнута орбіта охоплювала обидва цих небесних тіла. Так люди вперше змогли побачити зворотний бік Місяця. «Родзинкою» її було дзеркальце, погойдуються вгору-вниз і при цьому повільно що повертається навколо вертикальної осі зліва направо. З його допомогою створювалася порядкова запис всього зображення. Англійські астрономи, зробивши їх обробку і отримавши зображення місячної поверхні, не стали передавати його в друк, чекаючи, коли першими ці сенсаційні дані опублікують російські. Відповіді не було, тому, вважаючи себе вільними від подальшого дотримання коректності, британські дослідники передали знімок в газети. В результаті все зображення вийшло стилем з боків і розтягнутим у висоту - місячна поверхня постала у вигляді стирчать вгору вузьких загострених каменів, між якими були ще більш вузькі піщані обеліски

Брежнев, але поки тривало узгодження, настав пізній вечір, і його вирішено було не турбувати. Багато тисяч років тому, коли бачиш нічне небо, людина мріяв про політ до зірок. У 19 столітті з'явився фантастичне оповідання письменника Жюль Верна "З гармати на Місяць". Однак ці ракети були технічно необґрунтованою мрією. Вчені за багато століть не назвали єдиного розташованого у розпорядженні людини засобу, за допомогою якого можна подолати могутню силу земного тяжіння і полинути в міжпланетний простір. У 1911 році Цюлковський вимовив свої віщі слова: "Людство не залишиться вічно на Землі, але, в гонитві за світлом і простором, з початку боязко проникнути за межі атмосфери, а потім завоює собі всі близько земне простір". І з цього моменту великі уми планети почали працювати над початком реального освоєння космосу. Близько 20 польотів до Місяця американських автоматичних станцій за програмами «Рейнджер», «Сервейер» і «Лунар Орбітер» були строго підпорядковані підготовці до висадки людини на Місяць. Доставити туди експедицію повинна була гігантська ракета «Сатурн-V», створена під керівництвом Вернера фон Брауна, німецького конструктора снарядів «Фау», який після другої світової війни працював в США. Втім, Радянський Союз також не стояв осторонь від підготовки пілотованого «місячного» польоту

І тут астронавти в порушення програми попросили дозволу почати вихід на Місяць негайно. У романі «Із Землі на Місяць» французький письменник Жюль Верн так описав перший політ людей навколо нашого супутника. Перший пілотований корабель, облетів навколо Місяця, був запущений в Сполучених Штатах - як у романі, так і в дійсності. Фраза, за словами самого Армстронга, була «добре підготовленим експромтом», задалегідь обраним із сотень надійшли до польоту пропозицій. Такий зразок називався аварійним і повинен був братися, не відходячи від місячного модуля на випадок, якщо якісь надзвичайні обставини змусять астронавтів терміново сховатися всередині кабіни і покинути Місяць (такі ж зразки згодом бралися і всіма іншими п'ятьма «Аполлонами»). Гармата, з якої був випущений «місячний» снаряд, називалася Колумбіада, командний модуль корабля «Аполлон-11» носив ім'я «Колумбія». Снаряд у Жюль Верна приводився 11 грудня але був підібраний кораблем лише 29 грудня, що майже збігається з датою приводнення «Аполлона-8» - 27 січень. Повертаючись на Землю, як фантастичний, так і реальні космічні кораблі здійснювали посадку на воду в північній половині Тихого океану.

Результуючий текст був отриманий на основі документів «Досягнення у освоєнні космосу» і «Астрономічна картина миру» та містить інформацію про космічну гонку СРСР та США, висадку людини на місяць, відсилки до романів Жуль Верна, та інші релевантні дані, що вказує на коректний процес роботи системи запит-відповідь.

Для перевірки отриманої системи були проведені індивідуальні оцінки відповідей системи за бальним методом, що являє собою сукупність оцінок вимог до згенерованої відповіді від 0 до 1 із кроком 0,1. Усього таких вимог 5, тобто кожна відповідь сумарно може получить від 0 до 5 балів, а саме: присутність відповіді,

ступень збігу із тематикою запиту, повнота викладу, присутність тематичних розривів та присутність сенсових розривів. Усього у ході дослідження було проведено 100 тестів із різною складністю питань і різним тематичним напрямом запитів, на кожен з яких була отримана відповідна оцінка, фрагмент графіку значень якої зображено на рис. 4.



Рис. 4. Фрагмент графіку значень експертних оцінок системи для 50 тестів.

Середнє значення усіх проведених експертних оцінок склало 0,839, що вказує на задовільні результати роботи системи. Проведення мануального тестування показало наявність проблем у присутності сенсових розривів та необхідності обробки виключних ситуацій із відсутністю необхідних знань у системі, що і знизило сумарно оцінку роботи системи, проте ці факти не мають критичного впливу на алгоритм генерації відповідей. Виконання тестів системи запит-відповідь із використанням автоматичної генерації текстів показали адекватність роботи додатку як з точки зору використання семантичної моделі як основи для побудови інтелектуальних пошукових інструментів, так і з точки зору доцільності застосування семантичних моделей у ситуативній генерації текстів. Більш детально процес тестування створеної системи описаний у роботі [8].

Питання створення системи, що базується на деяких знаннях йде пліч о пліч із питанням адаптивності шляху накоплення цих знань. Розробка підходу, заснованого на побудові семантичної моделі документа створює великі можливості у цьому плані, дозволяючи незалежно наповнювати колекцію документів (і базу знань системи відповідно) текстами наукового стилю мовлення різної тематичної спрямованості. Система функціонує таким чином, що у користувача немає необхідності у ручній семантичній розмітці тексту, класифікації або перевірки тексту на відповідність якимось критеріям – достатньо лише завантажити документ у форматі plain text. Проте, такий підхід призводить до можливості наповнення системи знаннями, що недостатньо якісні для її стабільної роботи, що може створити надлишкову множину текстів для аналізу. До таких текстів, в першу чергу, відносяться недостатньо формалізовані документи, відповідність викладення інформації в яких суперечить науковому стилю

мовлення. Вирішенням цієї проблеми стало застосування процесу попередньої оцінки і автоматичної фільтрації документів за їх семантичною зв'язністю.

За створеним алгоритмом, кожен з текстів характеризувався двома значеннями – нормалізованим розміром тексту W_N , отриманого за формулою (3):

$$W_N = \frac{W_i - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}}, \quad (3)$$

де W_i – загальна кількість слів, W_{\min} та W_{\max} – найменша та найбільша кількість слів у навчальному корпусі, та нормалізованим семантичним значенням S_N , отриманим за формулою (4):

$$S_N = \frac{W_U - CW_C}{W - CW}, \quad (4)$$

де W_U – загальна кількість стем, W – загальна кількість слів, CW_C – кількість кластерів – стем, що мають зв'язок із кластерами-реченнями, CW – загальна кількість кластерів – стем.

Отримані таким чином данні є критеріями оцінки науковості тексту і водночас - навчальною вибіркою для включеної у структуру системи нейронної мережі, що має один прихований рівень, кількість нейронів у якому дорівнює кількості уроків що подано на вхід, та один вихід що може видавати значення 0 або 1 – наші класи тексту відповідно. Для навчання мережі використовується друге правило Хебба (дельта-правило), функцією активації є сигмоїдна функція, а значення зміщення одноразово обирається випадково у проміжку між -0.5 та 0.5 . Отримана навчена модель використовується для прогнозування зв'язності вхідних текстів, у випадку, коли користувач бажає доповнити базу знань системи – якщо відповідно до отриманого прогнозу документ що завантажується є достатньо формалізованим, він проходить побудову семантичної моделі та завантажується у базу знань системи, інакше користувач отримує помилку і завантаження не відбувається. Необхідно враховувати, що описані семантичні характеристики залежать від розміру тексту, тому зняті данні потребують попередньої нормалізації. В якості даних для навчання використовувалися тексти із описаного раніше корпусу – 50 текстів було використано як набір уроків (40% склали незв'язні тексти, а 60% - зв'язні). Для тестування отриманої мережі було виконано 100 тестів, данні для яких вибиралися з бази даних колекції текстів. Проведені тести показали точність роботи у 90 %, причому жоден прогноз щодо незв'язних текстів не був хибним – це стосується як цілком автоматично згенерованих текстів, що вказує на коректну обробку статичних властивостей тексту, так і фрагментарних текстів, що говорить про коректну обробку семантично незв'язних текстів. Такі результати вказують не тільки на достатню і задовільну точність роботи класифікатора і можливість його подальшого використання у системі, а і на адекватність семантичної моделі документу в цілому і її доцільності у застосуванні в інтелектуальних системах АОТ. Більш детально застосування системи класифікації наукових текстів розглянуто у [9–10].

Висновки

У роботі представлено комп'ютерну модель системи «запит-відповідь» із використанням автоматичної генерації текстів. Для вирішення головних наукових проблем моделі була розроблена та реалізована концепція безсловникової методики побудови семантичної моделі документу, що не має аналогів і використовує у своїй

роботі як базові методи синтаксичної обробки тексту, так і науково нові застосування латентно-семантичного аналізу, що у комплексі дозволили створити семантичну модель документу без попередньої розмітки та залучення додаткових словникових знань. Аналіз схожих розробок семантичних мереж вказує на інноваційність підходу, а проведені тестування показали, що алгоритм стійкий до семантичних змін і дійсно залежить саме від сенсу тексту, а не від випадковості або частотного подання. Окрім того, реалізована модель представлена у вигляді відкритого програмного АРІ [<https://github.com/yegorkovylin/sm-scr.git>], що дозволить розробникам систем АОТ отримувати кількісні моделі семантичних характеристик тексту без необхідності залучення лінгвістичних знань – прикладом такого застосування може служити розроблений у цій роботі засіб автоматичної оцінки семантичної зв'язності тексту, що використовує нейронну мережу, навчену на основі числових даних отриманих із семантичної моделі документу. Проведені тести роботи вказують на надійність процесу класифікації і доводять перспективність досліджень використання створеного алгоритму побудови семантичної моделі тексту для вирішення інших завдань АОТ, не розглянутих в рамках цієї роботи. Проведене дослідження розробки системи запит-відповідь на основі генерації текстів показує доцільність використання процесу породження текстів для формування відповіді на поставлене питання. У ході виконання дисертації був розроблений алгоритм і програмний додаток, що дозволяє створювати, на основі семантичних моделей нерозмічених колекцій документів, нові тексти, що містять відповіді на поставлені користувачем питання. Отримані результати проведеного тестування вказують на коректність і адекватність отриманого додатку.

Список літератури

1. Поляков П. Ю. Використання семантичних категорій в завданні класифікації відгуків про книги. *Матеріали міжнародної конференції «Діалог»* (м. Москва, 29 травня – 2 червня 2013 р.). Москва, 2013. С. 193–199.
2. Антонов А. В. Галактика Zoom. Оцінка модифікації методу формування інфопортрета. *Матеріали третього російського семінару по оцінці методів інформаційного пошуку*. (м. Ярославль, 6 жовтня 2018 р.). Ярославль, 2018. С. 226.
3. Губин М.Ю., Разин В.В., Тузовский А.Ф. Применение семантических сетей и частотных характеристик текстов на естественных языках для создания семантических метаописаний. *Проблемы информатики*. 2011. № S2. С. 59–63.
4. Pismak A. E., Kharitonova A. E. The Method of Automatic Formation of a Semantic Network from Weakly Structured Sources. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2016. Vol. 16. № 2. P. 324–330.
5. Волковський О. С., Ковилін Є. Р. Комп'ютерна система інтелектуального семантичного пошуку з використанням генерації текстів. *Вісник Херсонського національного університету*. 2018. № 3(66). С. 238–245.
6. Volkovsky O. S., Kovylin Y. R. Computer System of Building of the Semantic Model of the Document. *IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing*. (Lviv, August 21-25, 2018). P. 322–327. DOI: 10.1109/DSMP.2018.8478591.
7. Volkovsky O. S., Kovylin Y. R. Mathematical Model for Automatic Creation the Semantic Thesaurus for the Scientific Text. *System Technologies*. 2019. № 6. P. 82–88.
8. Волковський О. С., Ковилін Є. Р. Модель автоматичної оцінки адекватності комп'ютерних систем «запит-відповідь» з використанням генерації текстів. *Системні технології*. 2020. № 4 (129). С. 50–58.
9. Волковський О. С., Ковилін Є. Р. (2017). Комп'ютерна система автоматичного визначення зв'язності тексту. *Системні технології*. 2017. № 1 (112). С. 11–17.

10. Волковський О. С., Ковилін Є. Р. (2018). Комп'ютерна система автоматичного аналізу промислових інструкцій. *Системні технології*. 2018. № 3(116). С. 28–37.

References

1. Poliakov, P. Iu. (2013). Vykorystannia semantychnykh katehorii v zavdanni klasyfikatsii vidhukiv pro knyhy. Proceedings of the *international conference «Dialog»*. (Moscow, May 29 – June 2, 2013), pp. 193–199.
2. Antonov, A. V. (2018). Otsinka modyfikatsii metodu formuvannia infoportreta: Halaktyka Zoom. Proceedings of the *third Russian seminar on the evaluation of information retrieval methods*, (Yaroslavl, October 6, 2018), pp. 226.
3. Gubin, M. Yu., Razin, V. V., & Tuzovsky, A. F. (2017). Application of semantic networks and frequency characteristics of texts on natural languages for the creation of semantic metaposis. *Problems of Informatics*. **S2**, 59–64.
4. Pismak, A. E., & Kharitonova, A. E. (2016). The method of automatic formation of a semantic network from weakly structured sources. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. **16**, 2, 324–330.
5. Volkovskiy, O. S., & Kovylin, Ye. R. (2018). Kompiuterna sistema intelektualnoho semantychnoho poshuku z vykorystanniam heneratsii tekstiv. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho universytetu*. **66**, 3, 238–245.
6. Volkovsky, O. S., & Kovylin, Y. R. (2018). Computer System of Building of the Semantic Model of the Document. *2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing* (Lviv, August 21-25, 2018), pp. 322–327. DOI: 10.1109/DSMP.2018.8478591
7. Volkovsky, O. S., & Kovylin, Y. R. (2019). Mathematical model for automatic creation the semantic thesaurus for the scientific text. *System technologies*. **6**, 82–88.
8. Volkovskiy, O. S., & Kovylin, Ye. R. (2020). Model avtomatychnoi otsinky adekvatnosti kompiuternykh system «zapyt-vidpovid» z vykorystanniam heneratsii tekstiv. *Systemni tekhnolohii*. **4**, 50–58.
9. Volkovskiy, O. S., & Kovylin, Ye. R. (2017). Kompiuterna sistema avtomatychnoho vyznachennia zviaznosti tekstu. *Systemni tekhnolohii*. **1**, 11–17.
10. Volkovskiy, O. S., & Kovylin, Ye. R. (2018). Kompiuterna sistema avtomatychnoho analizu promyslovykh instruksii. *Systemni tekhnolohii*. **3**, 28–37.

Ковилін Єгор Романович – аспірант, Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, Україна, kovilin.yegor@gmail.com.

Волковський Олег Степанович – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, Україна, ffeks@365.dnu.edu.ua.

УДК 515.18 + 621.372.542

В.М. КОРЧИНСКИЙ, Д.Н. СВИНАРЕНКО
Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ПОВЫШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО И РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ИХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Предложен метод повышения пространственного и радиометрического разрешения цифровых изображений дистанционного зондирования, зафиксированных в произвольном количестве спектральных интервалов излучения – носителя видовой информации. Метод базируется на использовании аналитических сигналов, соответствующих функциям распределения яркости изображений спектральных каналов. Показано, что сопряженные по Гильберту составляющие аналитических сигналов, ортогональные функциям распределения яркости изображений спектральных каналов, обладают расширенным диапазоном распределений уровней яркости. На основе анализа аналитических сигналов, представляющих распределения яркости цифровых изображений, зафиксированных в различных спектральных каналах, предложен способ включения в распределения яркости изображений этих каналов компонент с более высокой, чем исходная линейной разрешающей способностью при сохранении спектральной информации. Реализация предлагаемого метода включает следующие этапы: попарную ортогонализацию распределений яркости изображений спектральных каналов; построение аналитических сигналов для каждой ортогонализированной спектральной компоненты зафиксированного многоспектрального изображения; замену сопряженных по Гильберту составляющих аналитических сигналов изображений спектральных компонент соответствующей составляющей изображения спектрального канала с максимальным пространственным разрешением. Реконструкция распределений яркости синтезированных указанным образом изображений выполняется посредством последовательного применения обратного преобразования Гильберта сформированных сопряженных компонент аналитических сигналов и преобразования, обратного по отношению к использованному алгоритму ортогонализации распределений яркости изображений спектральных каналов. В качестве количественной меры пространственного разрешения использована энергетическая энтропия распределений яркости. Показано, что предлагаемый метод обеспечивает сохранение структурной схожести функций распределения яркости исходных и синтезированных изображений спектральных каналов.

Ключевые слова: многоспектральное изображение; пространственное разрешение; радиометрическое разрешение; ортогонализация; аналитический сигнал; преобразование Гильберта; индекс структурной схожести.

В.М.КОРЧИНСЬКИЙ, Д.М.СВИНАРЕНКО
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОСТОРОВОВОГО ТА РАДІОМЕТРИЧНОГО РОЗРІЗНЕННЯ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ НА ОСНОВІ ЇХ АНАЛІТИЧНИХ СИГНАЛІВ

Запропоновано метод покращення просторового та радіометричного розрізнення цифрових зображень дистанційного зондування, зафіксованих у довільній

кількості спектральних інтервалів проміння – носія видової інформації. Метод базується на використанні аналітичних сигналів, які відповідають функціям розподілу яскравості зображень окремих спектральних каналів, що фіксуються. Показано, що спряжені за Гільбертом складові аналітичних сигналів, ортогональні функціям розподілу яскравості зафіксованих зображень спектральних каналів, мають розширений діапазон розподілів рівнів яскравості. На основі аналізу аналітичних сигналів, що подають розподіли яскравості цифрових зображень, зафіксованих у різних спектральних каналах, запропоновано спосіб включення до розподілів яскравості зображень цих каналів складових з більш високою, ніж вихідна, лінійною розрізнявальною здатністю при збереженні спектральної інформації. Реалізація запропонованого методу включає наступні етапи: попарну ортогоналізацію розподілів яскравості зображень спектральних каналів; визначення аналітичних сигналів для кожної ортогоналізованої спектральної компоненти зафіксованого багатоспектрального зображення; заміну спряжених за Гільбертом складових аналітичних сигналів зображень спектральних компонент відповідною складовою зображення спектрального каналу з максимальним просторовим розрізненням. Реконструкція розподілів яскравості синтезованих запропонованим способом зображень здійснюється послідовним застосуванням оберненого перетворення Гільберта від сформованих спряжених компонент аналітичних сигналів, що подають розподіли яскравості спектральних складових, та перетворення, оберненого стосовно використаного алгоритму ортогоналізації розподілів яскравості зображень спектральних каналів. За кількісну міру просторового розрізнення використана енергетична ентропія розподілів яскравості.

Показано, що запропонований метод забезпечує збереження структурної схожості функцій розподілів яскравості вихідних та синтезованих зображень спектральних каналів.

Ключові слова: багатоспектральне зображення; просторове розрізнення; радіометричне розрізнення; ортогоналізація; аналітичний сигнал; перетворення Гільберта; індекс структурної схожості.

V.M. KORCHYNSKYI, D.M. SVYNARENKO
Oles Honchar Dnipro National University

IMPROVED SPATIAL AND RADIOMETRIC RESOLUTION OF MULTISPECTRAL DIGITAL REMOTE SENSING IMAGES BASED ON THEIR ANALYTICAL SIGNALS

Method of increasing the spatial and radiometric resolution of digital images of remote sensing recorded in arbitrary number of spectral intervals of radiation - carrier of video information is proposed. The method is based on the use of analytical signals corresponding to the brightness distribution functions of the fixed spectral channel images. It is shown that Hilbert conjugated components of these analytical signals are orthogonal to functions of brightness distribution of spectral channel images and have extended dynamic range of brightness levels distributions. Based on the analysis of analytical signals representing the brightness distributions of digital images recorded in different spectral channels, a way of incorporating in the distribution of brightness of images of these channels is a component with a higher than the original linear resolution while maintaining spectral information. Implementation of the proposed method includes the following steps: pairwise orthogonalization of brightness distribution functions of fixed spectral channel images; constructing analytical signals for each orthogonalized spectral component of a fixed

multispectral image; replacement of Hilbert conjugated components of analytical signals of spectral images components by corresponding component of spectral channel image with maximum spatial resolution. Reconstruction of brightness distributions of synthesized images is carried out by sequential application of reverse Hilbert transform of generated conjugated components of analytical signals and transformation, and transformation inverse to used algorithm of orthogonalization the brightness distributions of images of spectral channels. It is shown that the proposed method ensures preservation of structural similarity of brightness distribution functions of brightness of initial and synthesized images for all fixed spectral channels. Energy entropy of brightness distributions is used as a quantitative measure of their spatial resolution.

Efficiency of proposed method is confirmed by comparative analysis of information entropies of initial and synthesized images of spectral channels.

Keywords: multispectral image; spatial resolution; radiometric resolution; orthogonalization; analytical signal; Hilbert transform; index of structural similarity.

Постановка проблемы

Цель тематического анализа цифровых изображений, формируемых средствами дистанционного зондирования, состоит в определении физического состояния визуализированных на них материальных объектов, представлениями которых являются распределения их собственной яркости. Отметим, что для повышения информативности формируемых видовых данных фиксация изображений производится в ряде спектральных интервалов излучения – носителя видовой информации (многоспектральные цифровые изображения, далее МСИ). Важнейшими характеристиками таких изображений являются их пространственная и радиометрическая разрешающие способности (соответственно минимальный различимый линейный размер визуализированного объекта и разброс уровней яркости его изображения). Вопросам анализа и обработки цифровых изображений посвящено значительное количество работ как теоретического, так и прикладного характера. Соответствующие результаты ориентированы главным образом на повышение визуального качества таких изображений, опосредовано связанного с проблемой повышения их пространственной и радиометрической разрешающих способностей.

В связи с этим актуальна проблема повышения информационной значимости МСИ дистанционного зондирования для их тематического анализа и дешифрирования посредством увеличения пространственного и радиометрического разрешения при сохранении спектральных характеристик.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время наиболее распространены методы увеличения информативности МСИ, базирующиеся на пирамидальных методах их предварительной обработки и сводящиеся к объединению в одном геометрическом объекте распределений яркости изображений нескольких спектральных каналов с различными пространственными разрешениями (концепция Data Fusion) [1–2]. Наиболее существенные результаты получены на основе вейвлет-технологий обработки двумерных цифровых сигналов [3–6], заключающихся в совмещении разномасштабных первичных данных. В прикладном плане результат такого совмещения сводится к увеличению контрастности синтезированных изображений и вследствие этого повышению различимости дискретизированных распределений яркости первичных сигналов. Количественные оценки разрешения полученных указанным способом изображений не производились. Динамический диапазон уровней яркости, а,

следовательно, и радиометрическое разрешение синтезированных изображений при этом не изменяются

Среди иных методов увеличения информативности многоспектральных видовых данных в аспекте их интерпретации и тематического анализа, отметим технологии субпиксельной обработки [7, 8] применительно к изображениям отдельных спектральных каналов МСИ (т.е. без их интерпретации как элементов единого геометрического объекта). Реализация этих методов требует перемасштабирования либо передискретизации первичных изображений и сопровождается неустранимой ошибкой интерполяции.

Цель исследования

Цель статьи – разработка метода увеличения пространственного и радиометрического разрешения многоспектральных цифровых изображений на основе разделения пространственных частот их составляющих, зафиксированных в различных спектральных диапазонах излучения - носителя видовой информации.

Изложение основного материала исследования

Реализация предлагаемого метода включает ряд этапов.

Первый этап состоит в ортогонализации функций распределений яркости изображений спектральных каналов цифрового МСИ с целью их декорреляции и реализуется следующим образом.

Представим множество уровней яркости МСИ двумерным массивом $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$, где n , m – размерности раstra многоспектрального изображения, k – количество его спектральных каналов; каждый столбец $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$ сформирован посредством упорядочения кодов яркости изображения k -го спектрального канала по строкам/столбцам. Далее рассматриваем массив $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$ как конкатенацию по столбцам k векторов: $\mathbf{G}_{n \times m \times k} = [\mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(1)}, \mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(2)}, \dots, \mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(r)}, \dots, \mathbf{X}_{n \times m \times 1}^{(k)}]$. Ортогонализацию столбцов массива $\mathbf{G}_{n \times m \times k}$ выполним посредством его QR-декомпозиции:

$$\mathbf{G}_{n \times m \times k} = \mathbf{Q}_{n \times m \times k} \cdot \mathbf{R}_{k \times k}, \quad (1)$$

где $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$ – матрица с ортогональными столбцами, $\mathbf{R}_{k \times k}$ – верхнетреугольная матрица.

Следующий шаг предлагаемого метода состоит в определении аналитических сигналов, соответствующих столбцам матрицы $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$: $\mathbf{A}_{n \times m \times k} = \mathbf{Q}_{n \times m \times k} + \sqrt{-1} \cdot \mathbf{H}_{n \times m \times k}$, где $\mathbf{H}_{n \times m \times k}$ – матрица, столбцы которой содержат преобразования Гильберта столбцов матрицы $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$ (сопряженные по Гильберту составляющие аналитических сигналов). Смысл использования аналитических сигналов определяет двумя обстоятельствами, следующими из свойств дискретного преобразования Гильберта: 1) матрицы $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$ и $\mathbf{H}_{n \times m \times k}$ имеют попарно ортогональные столбцы, т.е. независимы друг от друга; 2) динамический диапазон (разброс) значений столбцов $\mathbf{H}_{n \times m \times k}$ превышает динамический диапазон одноименных столбцов матрицы $\mathbf{Q}_{n \times m \times k}$, что следует из спектрального определения преобразования Гильберта как свертки исходного сигнала и преобразования Фурье от знаковой функции в частотной области [9–10].

Заключительным этапом процедуры повышения пространственного и радиометрического разрешения многоспектральных изображений является замена

сопряженных по Гильберту составляющих аналитических сигналов изображений спектральных компонент с номерами $s = \overline{1, k}$ соответствующей составляющей изображения спектрального канала r с максимальным радиометрическим разрешением, $\overline{H}_{n-m,s} = H_{n-m,r}$ ($s \neq r$), и формированием модифицированной матрицы аналитических сигналов

$$\overline{A}_{n-m \times k} = Q_{n-m \times k} + \sqrt{-1} \cdot \overline{H}_{n-m \times k}. \quad (2)$$

Собственно реконструкция синтезированных распределений яркости выполняется последовательным применением преобразований, обратных к преобразованиям (2) и (1).

Ниже приведены результаты тестирования предлагаемого метода применительно к многоспектральным изображениям земной поверхности, сформированным сканером Aster с космического аппарата Terra.

На рис. 1–3 представлены первичные растровые изображения трех спектральных каналов многоспектрального цифрового изображения с существенно различными пространственными и радиометрическими разрешениями.



Рис.1. Изображение спектрального канала 0.52 мкм – 0.60 мкм.



Рис.2. Изображение спектрального канала 1.60 мкм – 1.70 мкм.

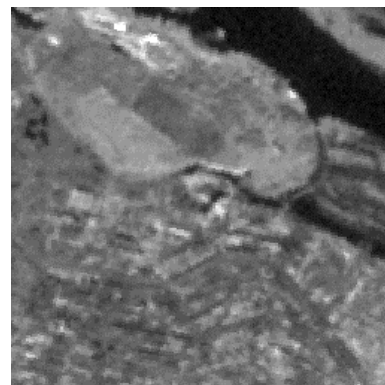


Рис.3. Изображение спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.

Как известно, пространственная разрешающая способность уменьшается с увеличением длины волны излучения – носителя видовой информации [3]. В качестве количественной меры пространственного разрешения цифровых изображений примем энергетическую энтропию их распределений яркости [11], значения которой для приведенных изображений представлены в таблице 1.

Таблица 1

Энергетическая энтропия, бит	Изображения		
	Рис.1	Рис.2	Рис.3
	5.3014	4.8102	4.7334

Значения динамических диапазонов уровней яркости приведенных изображений, являющиеся мерой их радиометрического разрешения, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Динамический диапазон уровней яркости	Изображения		
	Рис.1	Рис.2	Рис.3
	254	238	243

Изображения сопряженных по Гильберту компонент соответствующих аналитических сигналов приведены на рис. 4–6.

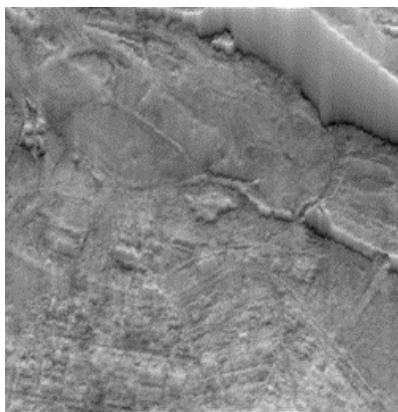


Рис. 4. Сопряженная компонента канала 0.52 мкм – 0.60 мкм.



Рис. 5. Сопряженная компонента канала 1.60 мкм – 1.70 мкм.

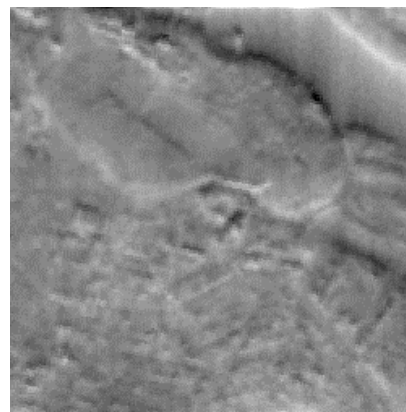


Рис. 6. Сопряженная компонента канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.

На рис. 7, 8 представлены изображения спектральных каналов 1.60 мкм – 1.70 мкм и 2.235 мкм – 2.286 мкм, синтезированные предложенным методом.



Рис. 7. Трансформированное изображение канала 1.60 мкм – 1.70 мкм.



Рис. 8. Трансформированное изображение канала 2.235 мкм – 2.285 мкм.

Сравнение изображений, представленных на рис. 2, 3 и на рис. 7, 8 свидетельствует о существенном повышении пространственного и радиометрического разрешения последних, о чем свидетельствуют и данные таблицы 3, в которой представлены соответствующие значения энергетических энтропий и динамических диапазонов уровней яркости

Таблица 3

Параметр	Изображения	
	Рис. 7	Рис.8
Энергетическая энтропия, бит	4.9215	4.8776
Динамический диапазон уровней яркости	248	253

Для анализа структурной схожести распределений яркости первичных МСИ и изображений, синтезированных предложенным методом, используем индексы и карты структурной схожести, построенные по методике, предложенной в работе [12].

В таблице 4 приведены индексы структурной схожести между парами изображений, приведенных на рис. 2, 3 и соответствующими синтезированными изображениями (рис. 7, 8).

Таблица 4

Индекс структурной схожести	Изображения			
	Рис. 2	Рис. 7	Рис. 3	Рис. 8
	0.8527		0.8924	

Данные таблицы свидетельствуют о высоком уровне схожести этих изображений. Отметим возрастание индексов структурной схожести с уменьшением информативности (пространственной разрешающей способности).

На рис. 9, 10 представлены карты структурной схожести наименее информативных исходных изображений, приведенных на рис. 2, 3 и соответствующих синтезированных изображений (рис. 7, 8), представляющие распределения локальных значений индекса структурной схожести по полю изображения (уровни потемнения отображают степени схожести соответственных геометрических объектов).

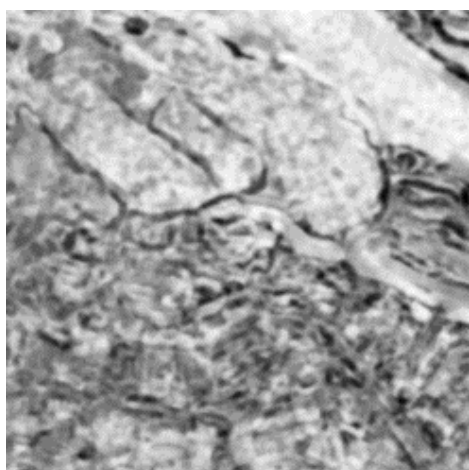


Рис. 9. Карта структурной схожести изображения спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм и его синтезированного изображения.

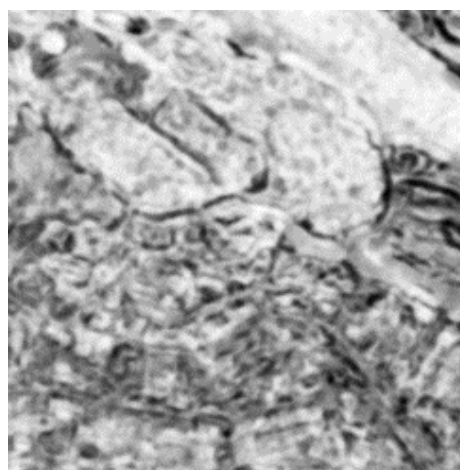


Рис. 10. Карта структурной схожести изображения спектрального канала 2.235 мкм – 2.285 мкм и его синтезированного изображения.

Как и данные таблицы 3, приведенные карты свидетельствуют о сохранении информации о геометрических формах объектов, представленных на первичных и синтезированных изображениях.

Выводы

В работе предложен новый метод представления и анализа многоспектральных изображений дистанционного зондирования. Метод обеспечивает совмещение отдельных реализаций таких сигналов в едином объекте с повышенными характеристиками информационной значимости, включая пространственное и радиометрическое разрешения при сохранении спектральной информации и высокой степени структурной схожести исходных и синтезированных изображений.

Список использованной литературы

1. Mahler R. Optimal/Robust Distributed Data Fusion: a Unified Approach. *Proceedings of SPIE* (USA, Orlando, April 24-26, 2000). Vol. 4052: Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition. №. 4. P. 128–138.
2. Wang Z. J., Ziou D., Armenakis C. A. Comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. № 43(6). P. 1391–1402. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846874.
3. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 556 с.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
5. Волошин В. И., Корчинский В. М. Повышение информативности видовых данных дистанционного зондирования Земли. *Космічна наука і технологія*. 2006. Т. 12, № 5/6. С. 15–16.
6. 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*, 2007. P. 315–323.
7. Sangeetha M., Senthilrajan H. Super Resolution. A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2016 Vol. 4, № 21. P. 1–5.
8. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. М.: ДОДЭКА-XXI. 2012. 720 с.
9. Вайнштейн Л. А., Вакман Д. Е. Разделение частот в теории колебаний и волн: монография. М.: Наука, 1983. 288 с.
10. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уодша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях: монография. М: Наука, 1989. 496 с.
11. Габидулин Э. М., Пилипчук Н. И. Лекции по теории информации. М.: МИФИ, 2007. 214 с.
12. Wang Z., Bovik A. K., Sheikh H. R., Simoncelli E. R. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004. Vol. 13. № 4. P. 600–612.

References

1. Mahler, R. (2000). Optimal/Robust Distributed Data Fusion: a Unified Approach. *Proceedings of SPIE* (USA, Orlando, April 24-26, 2000). Vol. 4052: Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition. №. 4, pp. 128–138.
2. Wang, Z. J., Ziou, D., & Armenakis, C. A. (2005). Comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **43**(6), 1391–1402. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846874.
3. Shovengerdt, R. A. (2010). Distantionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy. M.: Tehnosfera.
4. Gonsales, R., & Vuds, R. (2005). Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy. M.: Tehnosfera.
5. Voloshin, V. I., & Korchinsky, V. M. (2006). Povyishenie informativnosti vidovyih dannyih distantionnogo zondirvaniya Zemli. *Kosmichna nauka i tehnologia*. **12**, 5/6, 15–16.
6. Voloshin, V. I., Korchinsky, V. M., & Kharitonov, M. M. (2017). 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*. P. 315–323.

7. Sangeetha, M., & Senthilrajan, H. (2016). Super Resolution. A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology*. **4**, 21, 1–5.
8. Smit, S. Tsifrovaya obrabotka signalov. (2012). Prakticheskoe rukovodstvo dlya inzhenerov i nauchnyih rabotnikov. M.: DODEKA-XXI.
9. Vaynshteyn, L. A., Vakman, D. E. (1983). Razdelenie chastot v teorii kolebaniy i voln: monografiya. M.: Nauka.
10. Zalmanzon, L. A. (1989). Preobrazovaniya Fure, Uodsha, Naara i ih primenenie v upravlenii, svyazi i drugih oblastiakh: monografiya. M: Nauka.
11. Gabidulin, E. M., Pilipchuk, N. I. (2007). Lektsii po teorii informatsii. M.: MIFI.
12. Wang, Z., Bovik, A. K., Sheikh, H. R., Simoncelli, E. R. (2004). Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. **13**, 4, 600–612.

Корчинский Владимир Михайлович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем и сетей Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, e-mail: korchins50k@i.ua, ORCID: 0000-0001-6621-0631.

Свинаренко Дмитрий Николаевич – к.т.н., доцент, проректор по научно-педагогической работе Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, профессор кафедры телекоммуникационных систем и сетей Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, e-mail: svynarenko_dnu@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3179-9129.

УДК: 514.13

В.І. КУЗЬМИЧ, Л.В. КУЗЬМИЧ, О.Г. САВЧЕНКО
Херсонський державний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРЯМОЛІНІЙНОГО ТА ПЛОСКОГО РОЗМІЩЕННЯ ТОЧОК МЕТРИЧНОГО ПРОСТОРУ

У роботі розглядаються питання геометричної структуризації множин точок довільного метричного простору. Запропоновані методи побудови прямолінійно і плоско розміщених множин точок метричного простору. Такі множини є узагальненням понять, відповідно, прямої лінії і площини у класичній геометрії Евкліда. Побудова таких множин точок дає можливість моделювати різні геометричні образи у метричних просторах.

Поняття прямолінійного розміщення точок базується на класичному понятті «лежати між», що широко використовується у сучасних геометричних системах. У роботі використовуються поняття кута, утвореного трьома точками метричного простору, та поняття кутової характеристики цього кута. Ці поняття є базовими для визначення плоского розміщення точок метричного простору. Крім того, факт прямолінійного розміщення точок можна отримати, також, з використанням понять кута та його кутової характеристики.

Для встановлення факту плоского розміщення точок метричного простору використовується формула Юнгіуса обчислення об'єму тетраедра через довжину його бічних ребер. Умова рівності нулю цього об'єму є ознакою плоского розміщення чотирьох вершин тетраедра. У роботі використовується модифікована формула Юнгіуса, в якій об'єм тетраедра обчислюється через довжини трьох його ребер, що виходять з однієї вершини, та косинуси плоских кутів при цій вершині. Оскільки такі обчислення досить трудомісткі, то в роботі пропонується проводити їх із використанням програмного засобу «Калькулятор». За допомогою цього калькулятора можна встановити: чи існує тетраедр із заданими ребрами, і якщо так, то обчислити об'єм такого тетраедра.

У роботі наведені приклади прямолінійно та плоско розміщених множин точок у різних класичних метричних просторах. Зокрема, розглянуті приклади таких множин у просторі неперервних на відрізку функцій та у просторі інтегрованих за Ріманом на відрізку функцій. Деякі приклади вказують на «неевклідовість» понять прямолінійного та плоского розміщення точок. Це дає змогу моделювати у метричних просторах основні поняття та властивості неевклідових геометрій.

Ключові слова: пряма лінія; площина; кут; метричний простір; прямолінійно розміщена множина точок; кутова характеристика; плоско розміщена множина точок.

В.И. КУЗЬМИЧ, Л.В. КУЗЬМИЧ, А.Г. САВЧЕНКО
Херсонский государственный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО И ПЛОСКОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ТОЧЕК МЕТРИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

В работе рассматриваются вопросы геометрической структуризации множеств точек произвольного метрического пространства. Предложены методы построения прямолинейно и плоско расположенных множеств точек метрического пространства. Такие множества являются обобщением понятий, соответственно,

прямой линии и плоскости в классической геометрии Евклида. Построение таких множеств точек дает возможность моделировать различные геометрические образы в метрических пространствах.

Понятие прямолинейного размещения точек базируется на классическом понятии «лежать между», которое широко используется в современных геометрических системах. В работе используются понятие угла, образованного тремя точками метрического пространства, и понятие угловой характеристики этого угла. Эти понятия являются базовыми для определения плоского размещения точек метрического пространства. Кроме того, факт прямолинейного размещения точек можно получить, также, с использованием понятий угла и его угловой характеристики.

Для установления факта плоского размещения точек метрического пространства используется формула Юнгиуса вычисления объема тетраэдра через длину его боковых ребер. Условие равенства нулю этого объема является признаком плоского размещения четырех вершин тетраэдра. В работе используется модифицированная формула Юнгиуса, в которой объем тетраэдра вычисляется через длины трех его ребер, выходящих из одной вершины, и косинусы плоских углов при этой вершине. Поскольку такие вычисления достаточно трудоемки, то в работе предлагается проводить их с использованием программного средства «Калькулятор». С помощью этого калькулятора можно установить: существует ли тетраэдр с заданными ребрами, и если да, то вычислить объем такого тетраэдра.

В работе приведены примеры прямолинейно и плоско размещенных множеств точек в разных классических метрических пространствах. В частности, рассмотрены примеры таких множеств в пространстве непрерывных на отрезке функций и в пространстве интегрированных по Риману на отрезке функций. Некоторые примеры указывают на «неевклидовость» понятий прямолинейного и плоского размещения точек. Это позволяет моделировать в метрических пространствах основные понятия и свойства неевклидовых геометрий.

Ключевые слова: прямая линия; плоскость; угол; метрическое пространство; прямолинейно расположенное множество точек; угловая характеристика; плоско расположенное множество точек.

V.I. KUZ'MICH, L.V. KUZMICH, O.G. SAVCHENKO
Kherson State University

SIMULATION OF RECTILINEAR AND FLAT PLACEMENT OF POINTS OF METRIC SPACE

The paper deals with the issues of geometric structuring of sets of points of an arbitrary metric space. Methods for constructing rectilinear and flat sets of points of metric space are proposed. Such sets are a generalization of the concepts, respectively, of a straight line and a plane in the classical geometry Euclid. The construction of such sets of points makes it possible to model various geometric images in metric spaces.

The concept of rectilinear placement of points is based on the classical concept of 'lie between', which is widely used in modern geometric systems. The work uses the concept of an angle formed by three points of the metric space, and the concept of the angular characteristic of this angle. These concepts are basic for the definition of a flat placement of points in a metric space. In addition, the fact of the rectilinear placement of points can also be obtained using the concepts of angle and its angular characteristic.

For establish the fact that the points of the metric space are flat placement, the Jungius formula is used to calculate the volume of a tetrahedron in terms of the length of its lateral edges. The condition for this volume to be zero is a sign of the flat placement of the four vertices of the tetrahedron. The paper uses a modified Jungius formula, in which the volume of a tetrahedron is calculated in terms of the lengths of its three edges emerging from one vertex and the cosines of plane angles at this vertex. Since such calculations are rather laborious, it is proposed to carry out them using the 'Calculator' software tool. With the help of this calculator, you can determine whether there is a tetrahedron with given edges, and if so, calculate the volume of such a tetrahedron.

The paper gives examples of rectilinear and flat placement sets of points in different classical metric spaces. In particular, examples of such sets are considered in the space of continuous functions on an segment and in the space of Riemann-integrated functions on an segment. Some examples point to the 'non-Euclidean' concepts of rectilinear and flat placement of points. This allows modeling the basic concepts and properties of non-Euclidean geometries in metric spaces.

Key words: straight line; plane; angle; metric space; rectilinear placement set of points; angular characteristic; flat placement set of points.

Постановка проблеми

При обробці статистичних даних, при математичному моделюванні фізичних, економічних, соціологічних явищ та процесів виникає необхідність структуризації масивів числових даних, отриманих в результаті експериментів, спостережень, вимірювань. У останні роки значного розвитку та застосувань у різноманітних галузях науки та інженерії набули методи метричної геометрії. Метрична геометрія вивчає геометричні властивості та співвідношення між точками метричного простору. Ці властивості та співвідношення значною мірою залежать від метрики простору, тобто, від способу задання відстані між точками цього простору. Однак, є певні співвідношення, які несуть у собі геометричний зміст, і можуть бути однаково інтерпретовані у просторах з різною метрикою. До таких співвідношень можна віднести, наприклад, співвідношення «лежати між», «прямолінійне розміщення точок» або «плоске розміщення точок». Причому, ці співвідношення у метричній геометрії можна описати аналітично, за допомогою конкретних рівностей. Це дає можливість використовувати їх для структуризації даних і моделювання багатьох явищ та процесів за допомогою електронно-обчислювальної техніки.

У даній роботі будуть описані деякі методи побудови прямолінійно та плоско розміщених множин точок довільного метричного простору, а також наведені приклади побудови таких множин у конкретних класичних просторах з відомою метрикою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

З основними поняттями метричної геометрії можна ознайомитись по ряду монографій та посібників, написаних такими відомими математиками як Буземан [1], Берже [2], Бураго [3], а також, частково, по оглядовій статті Сабітова [4]. Властивості відношення «лежати між» для точок метричного простору досліджувались у роботах [5, 6]. Прямолінійне та плоске розміщення точок метричного простору вивчалось у роботах [7, 8].

Оскільки поняття метричного простору є базовим у математиці, то поряд з метричними просторами також активно вивчаються їх спеціальні класи та модифікації, що мають застосування у різних галузях сучасної науки. У зв'язку з цим відзначимо ультраметричні або неархімедові простори. Так, у [9] запропонована конструкція інваріантної метрики на вільній групі ультраметричного простору, яка є

функторіальною на категорії ультраметричних просторів діаметра не більше одиниці і не розтягуючих відображень. Ця конструкція визначає монаду на цій категорії. Наведено, також, опис категорії алгебр цієї монади як категорії лівоінваріантних ультраметричних груп діаметра не більше одиниці і нерозтягуючих гомоморфізмів.

Такими, що заслуговують особливої уваги, є розмиті метричні простори, зокрема, стаціонарні розмиті метричні простори та пов'язані з ними функторіальні конструкції [10], [11]. Так, в роботі [12] утворений за допомогою певної ультраметризації функтор ймовірнісних мір утворює монаду на категорії розмитих ультраметричних просторів та нерозтягуючих відображень. Встановлено, що функтор гіперпростору допускає продовження на категорію Клейслі монади гіперпростору.

Інтенсивно досліджуваними у теперішній час є метричні простори, які виникають на межі теоретичної інформатики та прикладної математики. Це так звані простори діаграм стійкості. Відстань між діаграмами стійкості є кількісною характеристикою віддаленості між собою великих масивів даних, тому такий метричний простір є об'єктом вивчення багатьох дослідників. Зокрема, в [13] доведено, що множина діаграм стійкості тісно пов'язана з однією з добре відомих конструкцій алгебраїчної топології — нескінченним симетричним добутком у сенсі Дольда і Тома.

Мета дослідження

Метою цієї роботи є опис методів геометричної структуризації метричних просторів, шляхом побудови прямолінійно та плоско розміщених множин точок у цих просторах. При побудові плоско розміщених множин точок використовується програмний засіб «Калькулятор», за допомогою якого можна встановити факт плоского розміщення чотирьох точок метричного простору.

Викладення основного матеріалу дослідження

У подальшому будемо користуватись наступним означенням метричного простору [14, с. 41].

Означення 1. *Метричним простором називається пара (X, ρ) , що складається з деякої множини (простору) X елементів (точок) і відстані, тобто однозначної, невід'ємної, дійсної функції $\rho(x; y)$, визначеної для будь-яких x і y з X , і яка задовольняє таким трьома аксіомам:*

- 1) $\rho(x; y) = 0$ тоді і тільки тоді, коли $x = y$ (x і y співпадають);
- 2) $\rho(x; y) = \rho(y; x)$ (аксіома симетрії);
- 3) $\rho(x; y) \leq \rho(x; z) + \rho(z; y)$ (аксіома трикутника).

Надалі будемо вважати, що всі розглядувані точки метричного простору різні (не співпадають), тому відстані між точками невід'ємні. Будемо використовувати, також, поняття кута, утвореного трьома точками метричного простору, та його кутової характеристики [7, с. 383]

Означення 2. *Нехай a, b, c – довільні точки метричного простору (X, ρ) . Упорядковану трійку (a, b, c) цих точок будемо називати кутом з вершиною у точці b , і позначати: $\angle(a, b, c)$. Пари точок (a, b) і (b, c) , при цьому, будемо називати сторонами кута.*

Означення 3. *Нехай a, b, c – довільні точки метричного простору (X, ρ) . Характеристикою кута $\angle(a, b, c)$, або кутовою характеристикою, будемо називати дійсне число $\varphi(a, b, c)$, що знаходиться за формулою:*

$$\varphi(a, b, c) = \frac{\rho^2(a, b) + \rho^2(b, c) - \rho^2(a, c)}{2\rho(a, b)\rho(b, c)}.$$

Надалі будемо використовувати зручніші позначення:

$$\rho(x_i, x_j) = \rho_{ij}, \quad \varphi(x_i, x_j, x_k) = \frac{\rho_{ij}^2 + \rho_{jk}^2 - \rho_{ik}^2}{2\rho_{ij}\rho_{jk}} = \varphi_{ijk} \quad (i, j, k = 1, 2, 3, \dots).$$

Тепер наведемо означення прямолінійного розміщення точок метричного простору.

Означення 4. Три точки a, b, c метричного простору (X, ρ) називають прямолінійно розміщеними у цьому просторі, якщо виконується рівність:

$$\rho(a, c) = \rho(a, b) + \rho(b, c).$$

Поняття прямолінійного розміщення точок метричного простору увів В.Ф. Каган [15, с. 527]. Це означення можна переформулювати, використовуючи кутову характеристику [7, с. 384].

Означення 5. Три точки a, b, c метричного простору (X, ρ) називають прямолінійно розміщеними у цьому просторі, якщо хоча б для однієї з них (наприклад, для точки b) виконується рівність: $\varphi^2(a, b, c) = 1$.

Множину точок метричного простору природно вважати прямолінійно розміщеною, якщо будь-які три її точки прямолінійно розміщені у цьому просторі.

Найпростішим прикладом прямолінійно розміщеної множини точок є множина дійсних чисел (точки одновимірного евклідового простору R^1). Відстань між двома точками x_1 і x_2 у цьому просторі знаходять за формулою: $\rho(x, y) = |x - y|$.

Більш складнішим прикладом прямолінійно розміщеної множини точок є множина лінійних функцій виду $y = kx$, якщо розглядати їх як точки метричного простору $C_{[0;1]}$ неперервних на відрізку $[0; 1]$ функцій. У цьому просторі відстань між двома функціями (точками простору) $f(x)$ і $g(x)$ знаходиться за формулою: $\rho(f, g) = \max_{x \in [0;1]} |f(x) - g(x)|$. Отже, відстань між функціями $y_1 = k_1x$ та $y_2 = k_2x$ у просторі $C_{[0;1]}$ буде: $\rho(y_1, y_2) = \max_{x \in [0;1]} |k_1x - k_2x| = |k_1 - k_2|$. Прямолінійне розміщення цієї множини точок у просторі $C_{[0;1]}$ впливає з властивостей множини дійсних чисел [7, с. 384; 16, с. 32].

Тепер розглянемо поняття плоского розміщення точок метричного простору. За аналогією з випадком прямолінійного розміщення точок, за характеристичну властивість плоского розміщення чотирьох точок x_1, x_2, x_3, x_4 візьмемо умову рівності нулю об'єму тетраедра, утвореного цими точками. Його можна обчислити, використовуючи формулу Юнгіуса [17, с. 99-100] об'єму тетраедра за довжинами його ребер $\rho_{12}, \rho_{13}, \rho_{14}, \rho_{23}, \rho_{24}, \rho_{34}$. Для проведення таких розрахунків можна використати програмний засіб «Калькулятор» [18, с. 63; 19, с. 68], який знаходиться за адресою: <http://ksuonline.ksu.ks.ua/mod/resource/view.php?id=2645>.

Рівність:

$$\begin{aligned} & \rho_{12}^2 \rho_{34}^2 (\rho_{13}^2 + \rho_{14}^2 + \rho_{23}^2 + \rho_{24}^2 - \rho_{12}^2 - \rho_{34}^2) + \\ & + \rho_{13}^2 \rho_{24}^2 (\rho_{12}^2 + \rho_{14}^2 + \rho_{23}^2 + \rho_{34}^2 - \rho_{13}^2 - \rho_{24}^2) + \\ & + \rho_{14}^2 \rho_{23}^2 (\rho_{12}^2 + \rho_{13}^2 + \rho_{24}^2 + \rho_{34}^2 - \rho_{14}^2 - \rho_{23}^2) - \\ & - \rho_{13}^2 \rho_{14}^2 \rho_{34}^2 - \rho_{12}^2 \rho_{14}^2 \rho_{24}^2 - \rho_{12}^2 \rho_{13}^2 \rho_{23}^2 - \rho_{23}^2 \rho_{24}^2 \rho_{34}^2 = 0 \end{aligned}$$

забезпечує рівність нулю тетраедра з вершинами у точках x_1, x_2, x_3, x_4 [18, с. 62].

Якщо використати кутові характеристики плоских кутів при вершині x_1 тетраедра, то останню рівність можна переписати у формі [7, с. 387; 18, с. 61]:

$$1 + 2\varphi_{213}\varphi_{214}\varphi_{314} - \varphi_{213}^2 - \varphi_{214}^2 - \varphi_{314}^2 = 0.$$

Тепер можна дати означення плоского розміщення чотирьох точок метричного простору [7, с. 387; 20, с. 42; 21, с. 11-12; 22, с. 63].

Означення 6. Будемо казати, що точки x_1, x_2, x_3, x_4 простору (X, ρ) плоско розміщені у цьому просторі, якщо хоча б для однієї з цих точок (наприклад, для точки x_1) виконується рівність

$$1 + 2\varphi_{213}\varphi_{214}\varphi_{314} - \varphi_{213}^2 - \varphi_{214}^2 - \varphi_{314}^2 = 0.$$

Множину точок метричного простору природно вважати плоско розміщеною, якщо будь-які чотири її точки прямолінійно розміщені в цьому просторі.

Співвідношення між прямолінійним і плоским розміщенням точок набагато складніше, ніж відношення між прямою лінією і площиною у геометрії Евкліда. «Неевклідовість» цих понять можна продемонструвати наступним прикладом.

У метричному просторі R_0^2 , де точками є пари дійсних чисел $a(a_1, a_2)$, відстань між двома точками $a(a_1, a_2)$ і $b(b_1, b_2)$ простору визначається формулою: $\rho(x, y) = \max(|a_1 - b_1|, |a_2 - b_2|)$. Чотири точки $a(1,0)$, $b(0,1)$, $c(-1,0)$, $d(0,-1)$ простору R_0^2 прямолінійно розміщені у цьому просторі [7, с. 387]. Кутіві характеристики дванадцяти усіх можливих кутів, утворених цими точками, прийматимуть такі значення:

$$\varphi(b, a, c) = 1, \varphi(b, a, d) = -1, \varphi(c, a, d) = 1, \varphi(a, b, c) = -1, \varphi(a, b, d) = 1,$$

$$\varphi(c, b, d) = 1, \varphi(a, c, b) = 1, \varphi(a, c, d) = 1, \varphi(b, c, d) = -1, \varphi(a, d, b) = 1,$$

$$\varphi(a, d, c) = -1, \varphi(b, d, c) = 1.$$

З цих значень випливає, що усі чотири точки розміщені прямолінійно у просторі R_0^2 (квадрати кутіві характеристик дорівнюють одиниці). Крім того, кожна з чотирьох точок лежить між деякими двома з них, тобто, крайніх точок серед них нема. Більше того, легко перевірити, що ці точки не є плоско розміщеними в цьому просторі. Наведені факти не можуть виконуватись у геометрії Евкліда.

Висновки

За допомогою засобів геометризації метричних просторів можливо провести структурування цих просторів, моделюючи геометричні образи основних понять геометрії Евкліда. Достатньо прості аналітичні перетворення при такому моделюванні дають можливість застосувати електронно-обчислювальні засоби при побудові відповідних геометричних образів.

У подальшому дослідження слід спрямувати на побудову аналогів класичних співвідношень між елементами геометричних фігур у геометрії Евкліда.

Список використаної літератури

1. Буземан Г. Геометрия геодезических. М.: Физматгиз, 1962. 503 с.
2. Берже М. Геометрия. Том 1. М.: Мир, 1984. 559 с.
3. Бураго Д. Ю., Бураго Ю. Д., Иванов С. В. Курс метрической геометрии. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 512 с.

4. Сабитов И. Х. Московское математическое общество и метрическая геометрия: от Петерсона до современных исследований. *Труды Московского математического общества*. 2016. Том 77. Вып. 2. С. 185–218.
5. Довгошей А. А., Дордовский Д. В. Отношение лежат между и изометрические вложения метрических пространств. *Укр. мат. журн.* 2009. № 10(61). С. 1319–1328.
6. Галушак С. І. Деякі геометричні криві у сенсі d-відрізка. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2016. № 1(33). С. 157–166.
7. Кузьмич В. І. Геометричні властивості метричних просторів. *Укр. мат. журн.* 2019. № 3(71). С. 382–399. DOI: 10.1007/s11253-019-01656-1
8. Kuz'mych, V. I., Savchenko A. G. Geometric Relations in an Arbitrary Metric Space. *Matematychni Studii*. 2019. № 1(52). С. 86–95. DOI: 10.30970/ms.52.1.76-85
9. Savchenko A., Zarichnyi M. Metrization of Free Groups on Ultrametric Spaces. *Topol. and Appl.* 2010. № 4(157). С. 724–729. <https://doi.org/10.1016/j.topol.2009.08.015>
10. Savchenko O. A Remark on Stationary Fuzzy Metric Spaces. *Carpathian Mathematical Publications*. 2011. № 1(3). С. 124–129. <http://journals.pu.if.ua/index.php/cmp/article/view/85>
11. Savchenko A. Fuzzy hyperspace monad. *Matematychni Studii*. 2010. № 2(33). С. 192–198. URL: http://matstud.org.ua/texts/2010/33_2/192-198.pdf
12. Savchenko A., Zarichnyi M. Probability Measure Monad on the Category of Fuzzy Ultrametric Spaces. *Azerb. J. Math.* 2011. № 1(1). 114–121. <https://www.azjm.org/volumes/0101/0101-6.pdf>
13. Kiosak V., Savchenko A., Zarichnyi M. Strong topology on the set of persistence diagrams. *AIP Conference Proceedings*. 2019. № 1(2164). С. 040006-1–040006-4. DOI:10.1063/1.5130798
14. Колмогоров А. М., Фомін С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. Київ: Вища школа, 1974. 456 с.
15. Каган В.Ф. Очерки по геометрии. М.: Издательство Московского университета, 1963. 571 с.
16. Кузьмич В., Кузьмич Л. Побудова прямолінійно розміщених множин при вивченні метричних просторів. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Серія: Педагогічні науки*. 2018. № 9(382). С. 30–36.
17. Понарин Я. П. Элементарная геометрия. Том 2: Стереометрия, преобразования пространства. М.: МЦНМО, 2006. 256 с.
18. Кузьмич В. І., Кузьмич Ю. В. Аналоги формули Юнгіуса об'єму тетраедра. *Вісник Черкаського університету. Серія: Педагогічні науки*. 2012. № 36(249). С. 55–64.
19. Kuzmich V. I., Kuzmich Y. V. Software Tool for Calculating the Volume of the Tetrahedron on the Lengths of its Edges. *Інформаційні технології в освіті*. Херсон: Видавництво Херсонського державного університету. 2012. Вип. 12. С. 67–72.
20. Кузьмич В. І. Побудова плоских образів у довільному метричному просторі. *Вісник Черкаського університету. Серія: Педагогічні науки*. 2017. № 11. С. 40–46.
21. Кузьмич В. І. Кутова характеристика у метричному просторі. *Algebraic and Geometric Methods of Analysis: International Scientific Conference: book of abstracts*. (Ukraine, Odessa, May 31 – June 5, 2017). Odessa, 2017. С. 11–12. URL: https://www.imath.kiev.ua/~topology/conf/agma2017/agma2017_abstracts.pdf
22. Кузьмич В. І. Плоско розміщені множини точок у метричному просторі. *Вісник Львівського університету. Серія: механіко-математична*. 2017. Вип. 83. С. 58–71.

References

1. Buzeman, G. (1962). *Geometriya geodezicheskikh*. M.: Fizmatgiz.
2. Berzhe, M. (1984). *Geometriya*. Tom 1. M.: Mir.
3. Burago, D. Yu., Burago Yu. D., & Ivanov S. V. (2014). *Kurs metriceskoy geometrii*. Moskva-Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy.
4. Sabitov, I. Kh. (2016). Moskovskoye matematicheskoye obshchestvo i metriceskaya geometriya : ot Petersona do sovremennykh issledovaniy. *Trudy Moskovskogo matematicheskogo obshchestva*. **77**, 2, 185–218.
5. Dovgoshey, A. A., & Dordovskiy, D. V. (2009). Otnosheniye lezhat' mezhdru i izometricheskiye vlozheniya metriceskikh prostranstv. *Ukr. mat. zhurn.* **61**, 10, 1319–1328.
6. Halushchak, S. I. (2016). Deyaki heometrychni kryvi u sensi d-vidrizka. *Prykarpat-s'kyy visnyk NTSH. Chyslo.* **33**, 1, 157–166.
7. Kuz'mych, V. I. (2019). Heometrychni vlastyivosti metrychnykh prostoriv. *Ukr. mat. zhurn.* **71**, 3, 382–399. DOI: 10.1007/s11253-019-01656-1
8. Kuz'mych, V. I., Savchenko, A. G. (2019). Geometric Relations in an Arbitrary Metric Space. *Matematychni Studii.* **52**, 1, 86-95. DOI: 10.30970/ms.52.1.76-85
9. Savchenko, A., Zarichnyi, M. (2010). Metrization of free groups on ultrametric spaces, *Topol. and Appl.* **157**, 4, 724–729. DOI: 10.1016/j.topol.2009.08.015
10. Savchenko, O. (2011). A remark on stationary fuzzy metric spaces. *Carpathian Mathematical Publications.* **3**, 1, 124–129.
Retrieved from <http://journals.pu.if.ua/index.php/cmp/article/view/85>
11. Savchenko, A. (2010). Fuzzy hyperspace monad. *Matematychni Studii.* **33**, 2, 192–198.
Retrieved from http://matstud.org.ua/texts/2010/33_2/192-198.pdf
12. Savchenko, A., Zarichnyi, M. (2011). Probability measure monad on the category of fuzzy ultrametric spaces. *Azerb. J. Math.* **1**, 1, 114–121.
Retrieved from <https://www.azjm.org/volumes/0101/0101-6.pdf>
13. Kiosak, V., Savchenko, A., Zarichnyi, M. (2019). Strong topology on the set of persistence diagrams. *AIP Conference Proceedings.* **2164**, 1, 040006-1–040006-4. DOI:10.1063/1.5130798.
14. Kolmogorov, A. M., Fomin, S. V. (1974). *Elementy teorii funktsiy i funktsional'noho analizu*. Kyiv: Vyshcha shkola,.
15. Kagan, V. F. (1963). *Ocherki po geometrii*. M.: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta.
16. Kuz'mych, V., Kuz'mych, L. (2018). Pobudova pryamoliniyno rozmishchenykh mnozhyn pry vyvchenni metrychnykh prostoriv. *Naukovyy visnyk Skhidnoyevropeys'koho natsional'noho universytetu imeni Lesi Ukrayinky. Seriya: Pedagogichni nauky.* **382**, 9, 30–36.
17. Ponarin, Ya. P. (2006). *Elementarnaya geometriya*. Tom 2: Stereometriya, preobrazovaniya prostranstva. M.: MTSNMO.
18. Kuz'mych, V. I., Kuz'mych, Yu. V. (2012). Analohy formuly Yunhiusa ob"yemu tetraedra. *Visnyk Cherkas'koho universytetu. Seriya: Pedagogichni nauky.* **249**, 36, 55–64.
19. Kuzmich, V. I., Kuzmich, Y. V. (2012). Software tool for calculating the volume of the tetrahedron on the lengths of its edges. *Informatsiyeni tekhnolohiyi v osviti: Kherson: Vydavnytstvo Khersons'koho derzhavnoho universytetu.* **12**, 67-72.
20. Kuz'mych, V. I. (2017). Pobudova ploskykh obraziv u dovil'nomu metrychnomu prostori. *Visnyk Cherkas'koho universytetu. Seriya: Pedagogichni nauky.* **11**, 40–46.
21. Kuz'mych, V. I. (2017). Kutova kharakterystyka u metrychnomu prostori. *Algebraic and geometric methods of analysis: International scientific conference: book of abstracts.* (Ukraine, Odessa, May 31 – June 5, 2017), pp. 11–12.

22. Kuz'mych, V. I. (2017). Plosko rozmishcheni mnozhyny tochok u metrychnomu prostori. *Visnyk L'vivs'koho universytetu. Seriya: mekhaniko-matematychna*. **83**, 58–71.

Кузьмич Валерій Іванович – к.ф.-м.н., доцент, професор кафедри алгебри, геометрії та математичного аналізу Херсонського державного університету, e-mail: kuzmich121251@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8150-3456.

Кузьмич Людмила Василівна – к.пед.н., доцент, доцент кафедри алгебри, геометрії та математичного аналізу Херсонського державного університету, e-mail: kuzmich121251@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6727-9064.

Савченко Олександр Григорович – д.ф.-м.н., професор, професор кафедри алгебри, геометрії та математичного аналізу Херсонського державного університету, e-mail: savchenko.o.g@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4687-5542.

УДК 004.9

О.М. МІХАЙЛУЦА, А.В. ПОЖУЄВ
Запорізький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В НАВЧАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ВИКЛАДАННЯ ЖИВОПISУ

З розвитком інформаційних технологій змінюються системи та методики навчання в сфері освіти суспільства, включаючи навчання малюванню. За допомогою комп'ютерних систем традиційні методи роботи з зображеннями були перетворені в більш ефективні та доступні. Ринок програмного забезпечення сповнений інструментів для обробки візуальної інформації - графічних редакторів, які дозволяють створювати, переглядати, обробляти і редагувати цифрові зображення. Важливість цієї групи програм полягає в багатому наборі функцій, які замінюють художні матеріали в реальному житті для досягнення певних цілей. Поєднання нових технологій з традиційним знанням живопису дозволяє вивести процес навчання на сучасний рівень, основні переваги якого відображаються в можливостях для продовження безперервної освіти.

Представлена стаття присвячена питанням, пов'язаним зі сферою застосування сучасних технологій в освітній системі навчання живопису, вивчення історичних етапів розвитку основних напрямків і прийомів живопису. Досліджується вплив комп'ютерної графіки на різні галузі сучасного життя, досліджується ринок графічних редакторів, розкриваються їхні переваги і недоліки, аналізується рівень їх використання в роботі художників і дизайнерів. Аналізуються теоретичні знання про колір і світло в комп'ютерній графіці. Розкрито можливості і принципи колірної моделі RGB, можливості використання просторової HSV-моделі в графічних редакторах і алгоритми перетворення колірних компонентів між колірними моделями HSV і RGB. Виявлено існуючі підходи до вирішення завдань навчання живопису з використанням графічних редакторів. Спроектована і розроблена універсальна комп'ютерна система під планшетні пристрої, яка надає можливість практикуватися в малюванні різними техніками живопису завдяки навчальним матеріалам з докладною послідовністю дій, має необхідний інструментарій для швидких начерків і деталізованих малюнків, для роботи з різними напрямками в дизайні і живопису, а також надає можливості його налаштування. Створений програмний продукт можна використовувати для навчання мистецтву художників і дизайнерів будь-якого рівня підготовки, він дозволяє швидко реалізовувати ідеї та скетчі майбутніх картин, виконувати твори в сучасному стилі. Досліджено тенденції розвитку та перспективи використання розробленого графічного редактора серед цільової аудиторії.

Ключові слова: графічний редактор, колірна модель, комп'ютерна графіка, HSV, RGB.

Е.Н. МІХАЙЛУЦА, А.В. ПОЖУЄВ
Запорожский национальный университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЧЕБНОЙ СИСТЕМЕ ПРЕПОДАВАНИЯ ЖИВОПИСИ

С развитием информационных технологий меняются системы и методики обучения в области образования общества, среди которых и преподавание живописи. С помощью компьютерных систем традиционные способы работы с изображением

модифицировались в более эффективные и доступные. Рынок программного обеспечения переполнен средствами для обработки визуальной информации - графическими редакторами, которые позволяют создавать, просматривать, обрабатывать и редактировать цифровые изображения. Важность данной группы программ заключается в большом наборе функций, которые заменяют художественные материалы в реальной жизни для достижения определенных целей. Сочетание новых технологий с увековеченными знаниями о живописи позволяет вывести процесс обучения на современный уровень, основные преимущества которого отражаются в увеличении возможностей для непрерывного образования.

Представленная статья посвящена вопросам, связанным с областью применения современных технологий в учебной системе преподавания живописи, изучением исторических этапов развития основных направлений и техник живописи. Исследовано влияние компьютерной графики на различные отрасли современной жизни. Исследован рынок графических редакторов, выявлены их преимущества и недостатки, проанализирован уровень их использования в работе художников и дизайнеров. Проанализированы теоретические знания о цвете и свете в компьютерной графике. Выявлены возможности и принципы работы цветовой модели RGB и возможности использования пространственной HSV-модели в графических редакторах, алгоритмы преобразования цветовых компонентов между цветовыми моделями HSV и RGB. Выявлены существующие подходы для решения задач обучения живописи с помощью графических редакторов. Спроектирована и разработана универсальная компьютерная система под планшетные устройства, которая предоставляет возможность практиковаться в рисовании различными техниками живописи благодаря учебным материалам с подробной последовательностью действий, имеет необходимый инструментарий для быстрых набросков и детализированных рисунков, для работы с различными направлениями в дизайне и живописи, а также предоставляет возможности его настройки. Созданный программный продукт можно использовать для обучения искусству художников и дизайнеров любого уровня подготовки, он позволяет быстро реализовывать идеи и скетчи будущих картин, выполнять произведения в современном стиле. Исследованы тенденции развития и перспективы использования разработанного графического редактора среди целевой аудитории.

Ключевые слова: графический редактор, цветовая модель, компьютерная графика, HSV, RGB.

O.M. MIKHAILUTSA, A.V. POZHUYEV
Zaporizhzhia National University

THE USE OF COMPUTER TECHNOLOGY IN THE EDUCATIONAL SYSTEM OF TEACHING PAINTING

With the development of information technology, training systems and methodologies in the public education field are changing, including the teaching of painting. By means of computer systems, traditional methods of working with images were modified into more efficient and affordable ones. The software market is full of tools for processing visual information - graphic editors that allow you to create, view, process and edit digital images. The importance of this group of programmes lies in a rich feature set that replace art materials in real life to achieve certain goals. The combination of new technologies with perpetuated knowledge of painting allows us to bring the learning process to the modern

level, the main advantages of which are reflected in increasing opportunities for continuing education.

The presented article is devoted to the issues related to the scope of modern technologies in the educational system of painting teaching, studying the historical stages of development of the main directions and painting techniques. The influence of computer graphics on various branches of modern life is investigated, the market of graphic editors is researched, their advantages and disadvantages are revealed and the level of their use in artists and designers work is analyzed. The theoretical knowledge of color and light in computer graphics is analyzed. The capacities and principles of the RGB color model, the possibilities of using the spatial HSV-model in graphic editors and the algorithms for converting color components between HSV and RGB color models are revealed. The existing approaches to solving the problems of teaching painting using graphic editors are identified. A universal computer system for tablet devices is designed and developed. It provides the opportunity to practice drawing with various painting techniques thanks to training materials with a detailed sequence of actions. It also has the necessary tools for quick sketches and detailed depictions, for working with different areas in design and painting, and also provides its customization options. The developed software product can be used to train artists and designers of any level of training. It allows you to implement ideas and sketches of future paintings quickly and to perform contemporary works. The development trends and prospects of using the designed graphic editor among the target audience are investigated.

Keywords: graphic editor, color model, computer graphics, HSV, RGB.

Постановка проблеми

На сьогоднішній день в багатьох професіях постійно виникає необхідність використання графічних програм, до яких звертаються не тільки дизайнери, художники, фотографи, поліграфісти, редактори видань, веб-розробники, але й багато інших фахівців, яким доводиться працювати з зображеннями. Базові знання цих програм необхідні для обробки особистих фотографій, оформлення рефератів, дипломів, різноманітних друкованих праць, дизайну тощо. Ці програми відкривають перед користувачами можливість не тільки в обробці різного роду, створення малюнків, макетів буклетів, листівок, візиток, логотипів, відновлення старих знімків, але й розробки дизайну повноцінних сайтів та ілюстрацій. За допомогою комп'ютера створюються схеми, графіки, діаграми, які призначені для наочного відображення різноманітної інформації у всіх галузях науки, техніки, медицини та комерційній діяльності. Тому область застосування комп'ютерної графіки не обмежується тільки художніми ефектами. Сучасна наукова комп'ютерна графіка дає можливість проводити обчислювальні експерименти з наочним представленням їх результатів. Для створення планових показників, звітів, статистичних зведень проектуються ілюстративні матеріали за допомогою ділової графіки. Конструкторська графіка використовується в роботі інженерів-конструкторів, архітекторів, винахідників нової техніки. Цей вид комп'ютерної графіки є обов'язковим елементом САПР. Засобами конструкторської графіки можна отримувати як плоскі зображення, так і тривимірні [1].

Однією з великих областей застосування графіки є мистецтво, що розподіляється на ілюстративну та рекламну графіку, комп'ютерну анімацію, графіку для Internet. Графічні пакети для цих цілей вимагають великих ресурсів комп'ютера по швидкодії і пам'яті. Відмінною рисою цих графічних пакетів є можливість створення реалістичних зображень та анімації. Отримання малюнків тривимірних об'єктів та їх масштабування і деформація пов'язані з великим обсягом обчислень. Передача освітленості об'єкта в залежності від положення джерела світла, від розташування тіней, від фактури поверхні, вимагає розрахунків, що враховують закони оптики. Поява

глобальної мережі Internet сприяла тому, що комп'ютерна графіка зайняла в ній важливе місце. Все більше удосконалюються способи передачі візуальної інформації, розробляються більш досконалі графічні формати та анімація.

Поєднання комп'ютерної графіки та живопису утворює спосіб, за допомогою якого художник реалізує свої творчі навички у сучасному вигляді через комп'ютер. Для цього використовуються програмні графічні засоби, редактори зображень і багато інших спеціалізованих програм, які дозволяють створювати і редагувати зображення. Комп'ютери та їх програмні можливості за останні два десятиліття замінили більшості художників та дизайнерів чорнило, фарби, туш, олівці та інші подібні інструменти для творчого процесу. Багато художників використовують програми різних типів для створення навіть однієї картини. Ринок комп'ютерних систем для роботи з графікою кожним роком збільшується, що у свою чергу надає можливість користувачам обирати необхідні для певних цілей програми. Дослідження графічних редакторів, які дають змогу користувачу безперервно навчатися живопису, допомагають розкрити творчий потенціал завдяки малюванню де-завгодно і будь-коли, є досить актуальним питанням. Проте не можна однозначно заявити, що існуючі системи повністю замінюють матеріали та інструменти у реальному житті. Але, поєднавши основний функціонал та додавши можливість застосовувати такі види техніки живопису, як гризайль, пастель, туш, сухий пензель, масло, можна отримати повноцінний програмний продукт, який стане невід'ємною частиною у роботі, навчанні художників та дизайнерів будь-якого рівня підготовки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Історія питання починається в далекі 1960-ті роки у США з появою фотореалізму, тобто спроби поєднати живопис з технічними досягненнями. Термін «фотореалізм» вперше згадується у 1970 році Л. Мейзелем як імітація фото засобами живопису [2]. Вивченням технологічних особливостей фотореалізму займався Б. Флемінг [3], який описує оригінальні методи конструювання на основі растрових карт, накладання текстури на поверхню об'єктів складної форми та інше.

В кінці минулого сторіччя в образотворчому мистецтві виникає новий напрямок – створення картини або малюнку повністю на персональному комп'ютері. Вивчення питання впливу комп'ютерних технологій на створення художнього образу у декоративному живопису та архітектурному проектуванню знаходить відображення у багатьох наукових роботах. Автор [4] обґрунтовує положення про те, що вплив сучасних комп'ютерних технологій на образ у живопису вимагає наукового дослідження процесу створення художнього образу від графічних інтерпретацій живопису до сучасної проектної мови. Однією з важливих галузей практичного застосування комп'ютерного мистецтва у сьогоденні є, безумовно, архітектура та дизайн. У роботі [5] автор розглядає медіаархітектуру як вид мистецтва, у якому твори виникають за допомогою сучасних інформаційних та медіа технологій. Розглядаються питання якості нової візуальної мови, естетичних характеристик медіаоб'єктів та їх зв'язків з існуючим архітектурним середовищем.

Аналіз сучасного стану та проблематика цифрового мистецтва розглянута у роботі [6]. Розглядаються можливості комп'ютерних технологій в образотворчому мистецтві і аналізуються художні твори зарубіжних і вітчизняних художників, які працюють в комп'ютерній графіці із застосуванням традиційних технік живописного зображення. У статті [7] представлено результати дослідження впливу цифрових комп'ютерних технологій на мистецтво і дизайн України. Зазначено, що цифрові комп'ютерні технології докорінно трансформували структуру образотворчого

мистецтва і визначили необхідність його переосмислення в проектуванні візуального художнього образу.

Мета дослідження

За дослідженнями основних напрямків та технік живопису, спроектувати та розробити комп'ютерну системи навчання живопису під планшетні пристрої, яка представляє собою універсальний графічний редактор, що має необхідний інструментарій для швидких начерків та деталізованих малюнків та для роботи з різними спрямуваннями у дизайні та живопису, а також для навчання мистецтву художників та дизайнерів будь-якого рівня підготовки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Порівняльний аналіз існуючих графічних редакторів, які надають усі можливості для навчання технікам живопису та вільної творчості професіоналів виявив, що графічна система Fifty Three надає зручний робочий інтерфейс, можливість керувати проектами, зображеннями та необхідні інструменти для малювання як у реальному житті. Завдяки зручності використання, функціоналу, широкому вибору інструментів для малювання, наявності десктопної версії, графічний редактор SketchBook Pro є одним з кращих додатків для професіональних художників та початківців. Лідер серед графічних редакторів під планшетні пристрої для навчання живопису, додаток Water Color Pencil має особисту перевагу перед іншими системами – реалістичність текстур та пензлів. Разом з тим, що даний редактор є єдиним для роботи з акварельними олівцями та фарбами, при роботі з Water Color Pencil можна використовувати інші матеріали та інструменти, що виводить його на один рівень у функціонуванні і виділяє серед інших графічних редакторів водночас. При проектуванні та розробці комп'ютерної системи враховуються переваги та недоліки існуючих методів рішення поставленої задачі, що робить додаток більш вдосконаленим графічним редактором для навчання живопису.

Припускаючи, що за часів зародження живопису всі кольори вважалися чистими тонами, тобто незалежними один від одного, досвід роботи спеціалістів показав, що одні зі спектральних кольорів можуть бути отримані змішуванням барвистих пігментів, а інші – ні. Саме ця обставина дозволила розділити кольори на елементарні (червоний, жовтий, синій) і похідні (суміш первинних кольорів). Кольори і колірні відмінності можуть бути виражені за допомогою різних математичних методів, для яких розроблені кілька моделей представлення кольору, що допомагають однозначно визначити будь-який відтінок. Колірні моделі дозволяють за допомогою математичного апарату описати певні колірні області спектра, а також описують колірні відтінки за допомогою змішування декількох основних кольорів.

Професійні графічні програми зазвичай дозволяють оперувати з кількома колірними моделями, більшість з яких створено для спеціальних цілей або особливих типів фарб: CMYK, RGB, HSV, HLS, LAB, YIQ, Grayscale. Типовим представником просторових колірних моделей є модель HSV – трьохканальна колірна модель, будь-який колір якої характеризується тоном, насиченістю і яскравістю. Будучи розробленою для комп'ютерних графічних додатків, модель HSV сьогодні використовуються у колірних палітрах та в програмах редагування зображень. Для її представлення частіше використовується циліндрична система координат, яка перебудовує геометрію RGB колірної моделі для більшої наочності. Модель HSV є простим перетворенням моделі RGB і визначає фізичні кольори залежно від червоного, зеленого і синього. Кожне чисельне HSV значення описує різні кольори для кожної основи RGB-простору.

Більшість існуючих просторових колірних моделей легко можуть бути представлені у вигляді ряду колірних тіл, побудованих за єдиним алгоритмом, в основу якого можуть бути покладені два елементи: колірна площина і сіра шкала. На колірній площині може бути розташований колірний круг, трикутник чи будь-яка інша двовимірні колірна схема. Площина дозволяє відобразити не тільки основні спектральні кольори, але й закон зміни їх насиченості, тобто процес зміни кольорів при поступовому зменшенні кількості пігменту, що замінюється білим фоном зображення. Перпендикулярна до площини сіра шкала, що починається в її білому полюсі, містить плавний ахроматичний перехід до чорного полюсу, що знаходиться на протилежному кінці. При всій наочності таких моделей, вони не враховують особливостей психофізичного сприйняття людиною різних областей спектра, припускаючи однакову для всіх кольорів інтенсивність. Модель HSV не є суворою математичною моделлю. Опис кольорів в ній не відповідає кольорам, що сприймаються оком. Хоча модель HSV декларована як апаратно-незалежна, насправді в її основі лежить RGB.

Більшість телевізорів, комп'ютерних дисплеїв і проекторів відображають колір, комбінуючи з різною інтенсивністю червоне, зелене, і синє світло – адитивні первинні RGB-кольори. Отримані суміші в RGB-колірному просторі можуть відтворювати широкий спектр кольорів. Модель HSV є корисною не тільки тому, що вона є більш інтуїтивною у користуванні, ніж налаштування значень RGB, але також тому, що перетворення в RGB (і навпаки) можна дуже швидко обчислити. Отже, ця модель і подібні їй все далі розповсюджуються у графічних програмах для редагування зображень.

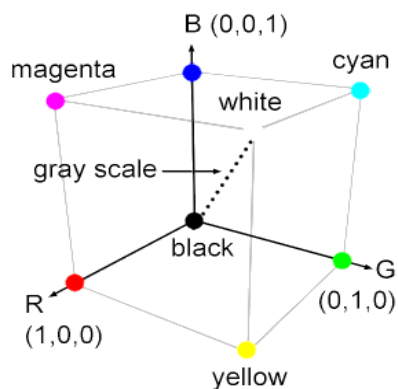


Рис. 1. RGB-колірні модель, представлена у вигляді кубу.

При створенні комп'ютерної системи навчання живопису використовуються два алгоритми перетворення колірних компонентів між HSV та RGB. Разом ці моделі надають більше можливостей по налаштуванню кольору. У моделі HSV представлений RGB-простір у вигляді куба зі значенням червоного, зеленого і синього кольорів: $R, G, B \in [0,1]$ (рис. 1). Нахиливши куб на кут так, що чорний опинився з білим на одній вертикальній осі, вимірювався

відтінок кольору в кубі кутом навколо цієї осі, починаючи з червоного при 0° . Для обчислення відтінку, похилий RGB-куб проектуємо на «кольорову площину», перпендикулярно до осі, отримуючи форму шестикутника. Тон обчислюється кутом вектора до точки в проекції, а кольоровість – відстанню від точки до початку координат.

Для перетворення HSV до RGB інвертуються вказані вище значення ($R, G, B \in [0,1]$). Значення кольоровості обчислюються шляхом множення насиченості і максимальної насиченості для даної яскравості: $C = V \times S$. Далі на одній з трьох нижніх граней куба RGB знаходимо точку, яка має той же відтінок і насиченість кольору (використовуючи проміжне значення X для другої за величиною складовою цього кольору):

$$H' = \frac{H}{60^\circ}; \quad X = C \times \left(1 - \left| \frac{H}{60} \bmod 2 - 1 \right| \right);$$

$$(\dot{R}, \dot{G}, \dot{B}) = \begin{cases} (C, X, 0), 0 \leq H \leq 60; \\ (X, C, 0), 60 \leq H \leq 120; \\ (0, C, X), 120 \leq H \leq 180; \\ (0, X, C), 180 \leq H \leq 240; \\ (X, 0, C), 240 \leq H \leq 300; \\ (C, 0, X), 300 \leq H \leq 360. \end{cases}$$

При цілочисельному кодуванні для кожного кольору в HSV є відповідний колір в RGB. У комп'ютерах подання кожної з координат HSV представляються у вигляді одного октету, значення якого позначається для зручності цілими числами від 0 до 255 включно, де 0 – мінімальна, а 255 – максимальна інтенсивність [8]. Кожному кольору можна зіставити код, використовуючи десяткове і шістнадцятиричне представлення коду. При десятковому поданні перше число відповідає яскравості червоної складової, друге – зеленої, третє – синьої, при шістнадцятиричному поданні перша пара цифр відповідає яскравості червоного кольору, друга пара цифр – зеленого, третя пара цифр – синього. Максимальна яскравість всіх трьох базових складових відповідає білому кольору, мінімальна – чорному кольору. Кожен раз HSV конвертується в RGB для відображення на моніторі. Отже, комп'ютерні художники використовують HSV модель, оскільки вона непогано узгоджується зі сприйняттям людини: колірний тон є еквівалентом довжини хвилі світла, насиченість – інтенсивності хвилі, а яскравість – кількості світла; дана модель є зручною та зрозумілою і має великий колірний простір.

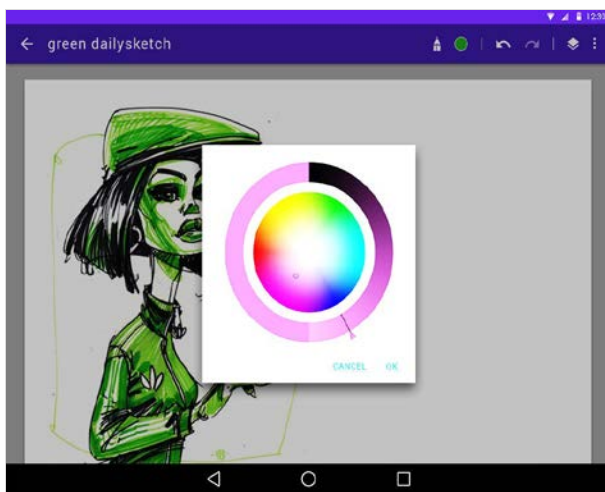


Рис. 2. Приклад інтерфейсу компоненту по налаштуванню кольору.

Недоліком такої моделі є необхідність перетворення в модель RGB для відображення на екрані монітора або в модель CMYK для отримання поліграфічного відбитка, а будь-яке перетворення з моделі в модель не обходиться без втрат виведення кольору.

Налаштування кольору є незамінною частиною у роботі графічних дизайнерів або художників-ілюстраторів для розробки фірмового оформлення веб-сайту, логотипу, тому що різні кольори мають різні значення в кожній країні, а отже, викликають різні емоції. Модуль для роботи з кольором в розробленому графічному

редакторі відповідає наступним вимогам: відображення кола з неперервним представленням кольорових тонів; відображення компоненту регулювання насиченості; відображення движка яскравості; представлення у цілочисельному кодуванні кольору у RGB та HSV (рис. 2). Для налаштування кольору потрібно обрати на колі тон, а для зміни насиченості – рухатись у центр кола. Панель налаштування яскравості знаходиться справа від кола, її також можна змінювати після вибору основного колірному тону. З лівої частини від кола розташовано панель з відображенням обраного кольору після усіх налаштувань.

Користувач розробленого графічного редактору має можливість малювати різноманітними інструментами. Комп'ютерна система підтримує найголовніші функції, серед яких: управління проектами, робота з зображеннями, навчання живопису за посібниками з викладеними теоретичним матеріалом та детально розробленими практичними уроками. Функціонал комп'ютерної системи навчання живопису максимально приближений до дій при користуванні скетчбуку та інструментів у реальному житті. Завдяки цьому програмний продукт зручний у керуванні проектами, у малюванні різними інструментами та налаштуванні шарів при редагуванні зображень. Навчальні уроки надають користувачу послідовні дії при малюванні зображень різного рівня складності. Грамотне проектування візуальної частини системи – запорука ефективного впливу на цільову аудиторію і основний фактор успішного використання. Тому для проектування графічного інтерфейсу користувача системи навчання живопису використовувалися основні метрики та гайдлайни під операційну систему Android. Інтерфейс робочого вікна для малювання містить панель додатку, на якому розташовано назву проекту та елементи інтерфейсу для виконання таких дій, як

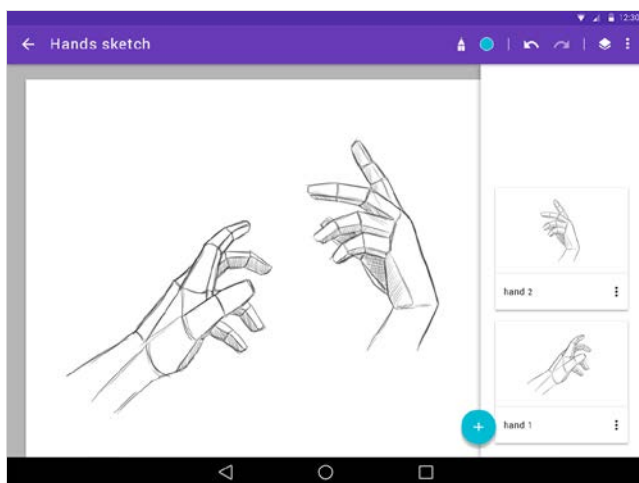


Рис. 3. Приклад інтерфейсу робочого вікна з відображенням шарів проекту.

повернення до головного вікна, вибір інструмента та кольору, управління історією та шарами проекту (рис. 3), збереження та перегляд зображення у повно екранному режимі, а також основний контент з зображенням.

Наявність навчальної системи у розробленому графічному редакторі робить його унікальним серед інших аналогів. Вона представлена посібниками з викладенням теоретичного матеріалу та детально розроблених практичних уроків. Після проходження кожного етапу навчального уроку та при переході на наступний зберігається виконана

робота на кожному шарі (рис. 4). Це допоможе користувачу порівняти його зображення з наведеними прикладами та покращити свої навички у малюванні. За допомогою такої системи можна закріпити свої знання в основах колористики, техніках живопису та їх застосуванні на практиці, а завдяки урокам – знайти особистий стиль малювання.

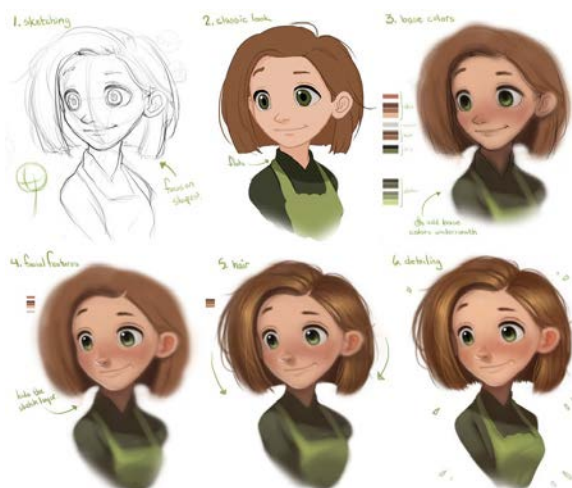


Рис. 4. Приклад поетапного малювання у навчальних уроках.

Перспективи розвитку комп'ютерної системи.

В подальшому графічний редактор можуть використовувати у своїй роботі художники та дизайнери будь-якого рівня підготовки, школярі та студенти у навчальному процесі у художніх школах або університетах на курсах комп'ютерної графіки та дизайну. Завдяки широкому вибору інструментів цільова аудиторія системи збільшується і включає чотири групи користувачів – «Каліграфи та

райтери», «Дизайнери-ілюстратори», «Дизайнери початкового рівня» та «Графічні дизайнери». Для ілюстраторів або дизайнерів навчального рівня підготовки будуть корисними навчальні посібники з технік живопису, як гризайль, пастель, туш, сухий пензель, масло, а згодом будуть інтегровані уроки з таких складних технік. Також для професіоналів у мистецтві та дизайні буде збільшений вибір інструментів, реалістичних текстур та полотен для малювання аквареллю або маслом. За допомогою розробленого графічного редактору можна виконувати ілюстрації високого рівня, придбавши при цьому лише планшетний пристрій та стилус, не витрачаючи кошти на дорогі матеріали для художників, як холости, пензлі, мастихіни, пастель, масляні або акварельні фарби.

Також відомо, що реалістичність та масштабність твору передається лише в тому випадку, коли вона зроблена у реальному світі, але завдяки створеній комп'ютерній системі можна буде швидко реалізувати ідеї та скетчі майбутніх картин. Вона допоможе виконати твори у сучасному напрямі, поєднавши різні техніки, засоби малювання і, насамперед, розкрити творчий потенціал завдяки малюванням де-завгодно і будь-коли через портативність та зручність планшетних пристроїв.

Висновки

Проведення ряду досліджень у галузі застосування сучасних технологій у навчальній системі викладання живопису та аналіз впливу комп'ютерної графіки на різноманітні галузі сучасного життя дозволило спроектувати і розробити універсальну комп'ютерну систему під планшетні пристрої, яка надає можливість практикуватися в малюванні різними техніками живопису завдяки навчальних матеріалів з докладною послідовністю дій, має необхідний інструментарій для швидких начерків і деталізованих малюнків, для роботи з різними напрямками в дизайні і живопису. Створений програмний продукт можна використовувати для навчання мистецтву художників і дизайнерів будь-якого рівня підготовки, дозволяє швидко реалізовувати ідеї та скетчі майбутніх картин, виконувати твори в сучасному стилі.

Список використаної літератури

1. Пантюхин П. Я. Компьютерная графика. Т. 1. М: ИД ФОРУМ, 2012. 88 с.
2. Meisel L. K. Photorealism. N.Y.: Harry N. Abrams Inc., 1980. 368 p.
3. Флеминг Б. Создание фотореалистичных изображений. Москва, 1999. 383 с.
4. Шадурич А. В. Компьютерная техника как новый инструмент создания художественного образа в декоративной живописи и архитектурном проектировании. *Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики.* 2017. № 10(84). С. 191–194.
5. Птичникова Г. А. Эстетика медиаархитектуры. *Искусство XX–XXI веков. Стилистики и направления.* 2019. № 1. С. 144–161.
6. Воложанина Е. А. Проблематика цифровой живописи. *Архитектура и дизайн.* 2019. № 1. С. 9–13.
7. Храмова-Баранова О. Л., Галенко А. В. Развитие цифровых компьютерных технологий, их влияние на искусство и дизайн Украины. *Гуманитарный вестник.* 2017. № 27. Вып. 11. С. 82–87.
8. Петров А. Компьютерная графика. Санкт-Петербург: Питер, 2011. 320 с.

References

1. Pantyukhin, P. Ya. (2012). *Komp'yuternaya grafika*. T. 1. M: ID FORUM.
2. Meisel, L. K. (1980). *Photorealism*. N.Y.: Harry N. Abrams Inc.
3. Fleming, B. (1999). *Sozdaniye fotorealistichnykh izobrazheniy*. Moskva.
4. Shadurin, A. V. (2017). *Komp'yuternaya tekhnika kak novyy instrument sozdaniya khudozhestvennogo obraza v dekorativnoy zhivopisi i arkhitekturnom proyektirovani*. *Istoricheskiye, filosofskiyе, politicheskiye i yuridicheskiye nauki, kul'turologiya i iskusstvovedeniye. Voprosy teorii i praktiki*. **10(84)**, 191–194.
5. Ptichnikova, G. A. (2019). *Estetika mediaarkhitektury. Iskustvo XX–XXI vekov. Stilistiki i napravleniya*. **1**, 144–161.
6. Volozhanina, Ye. A. (2019). *Problematika tsifrovoy zhivopisi. Arkhitektura i dizayn*. **1**, 9–13.
7. Khramova-Baranova, O. L., & Halenko, A. V. (2017). *Rozvytok tsyfrovyykh komp'yuternyykh tekhnolohiy, yikh vplyv na mystetstvo i dizayn Ukrainy. Humanitarnyy visnyk*. Vol. 11. **27**, 82–87.
8. Petrov, A. (2011). *Komp'yuternaya grafika*. Sankt-Peterburg: Piter.

Міхайлуца Олена Миколаївна – к.т.н, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Запорізького національного університету, e-mail: elenamikhaylutsa7@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2935-7997.

Пожуєв Андрій Володимирович – к.ф.-м.н., доцент, завідувач кафедри загальноосвітніх дисциплін Запорізького національного університету, e-mail: scorpio6828@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4083-5139.

УДК 004.942

В.Ф. МИРГОРОД, И.М. ГВОЗДЕВА

Национальный университет «Одесская морская академия»

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ НЕКОТОРЫХ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ТРЕНДА

Предлагается подход к выбору и сравнению критериев, которые применяются при анализе временных рядов параметров регистрации технического состояния сложных технических объектов. Подход основан на установленных важной характеристике трендовых критериев, а именно мощности таких критериев, которые рассматриваются как критерии различения сложных гипотез. Для анализа предлагается статистическая модель порождения данных в виде совокупности детерминированной трендовой и случайной составляющих. Детерминированная составляющая рассматривается в виде линейного приближения ее разложения в ряд Тейлора. Такое допущение обосновывается необходимостью выявить тренд на наиболее коротком промежутке времени, на котором трендовая составляющая допускает линейное приближение. Случайная составляющая принимается в виде выборки из генеральной совокупности независимых случайных величин, которые имеют нормальное распределение. Для анализа избраны наиболее распространенные непараметрические критерии тренда: критерий Вальда-Вольфовитца; критерий Бартлеса; критерий инверсий; а также параметрический корреляционный критерий для сравнения. Опорная гипотеза имеет вид принадлежности временного ряда к выборке из генеральной совокупности независимых случайных величин, а альтернатива – принадлежности к выборке с линейным трендом. Трендовые статистики соответствующих критериев сформированы на скользящем или секционном непересекающемся окне анализа заданной размерности. Параметром развития тренда избрано отношения прироста тренда за время анализа к СКО случайной составляющей. Для рассмотренных трендовых критериев получены зависимости их мощности от параметра развития тренда и вероятности ошибки первого рода (ошибочная тревога), а также оперативные характеристики критериев. Анализ выполнен методами аналитических оценок и статистического моделирования. Установлено, что в случае альтернативы статистики анализируемых критериев нормализуются, а статистика корреляционного критерия своего вида не изменяет. Сравнение трендовых критериев по мощности при равных значениях вероятности ошибки первого рода позволяет установить преимущество критерия инверсий, а худшие показатели имеет критерий Вальда-Вольфовитца. Оценка мощности критериев тренда имеет важное значение для прикладных применений, поскольку позволяет установить вероятность ошибки второго рода (пропуск тренда).

Ключевые слова: временные ряды; тренд; критерии; мощность критерия; статистическое моделирование; диагностика.

В.Ф. МИРГОРОД, І.М. ГВОЗДЕВА

Національний університет «Одеська морська академія»

ОЦІНКА ПОТУЖНОСТІ ДЕЯКИХ НЕПАРАМЕТРИЧНИХ КРИТЕРІЇВ ТРЕНДУ

Пропонується підхід до вибору і порівняння критеріїв, які застосовуються при аналізі часових рядів параметрів реєстрації технічного стану складних технічних об'єктів. Підхід заснований на встановленні важливої характеристики трендових критеріїв, а саме потужності таких критеріїв, які розглядаються як критерії розрізнення складних гіпотез. Для аналізу пропонується статистична модель

породження даних у вигляді сукупності детермінованої трендової і випадкової складових. Детермінована складова розглядається у вигляді лінійного наближення її розвинення в ряд Тейлора. Таке припущення обґрунтовується необхідністю виявити тренд на найбільш короткому проміжку часу, на якому трендова складова допускає лінійне наближення. Випадкова складова приймається у вигляді вибірки з генеральної сукупності незалежних випадкових величин, які мають нормальний розподіл. Для аналізу обрані найбільш поширені непараметричні критерії тренду: критерій Вальда-Вольфовітца; критерій Бартлеса; критерій інверсій; а також параметричний кореляційний критерій для порівняння. Опорна гіпотеза має вигляд приналежності часового ряду до вибірки з генеральної сукупності незалежних випадкових величин, а альтернатива – приналежності до вибірки з лінійним трендом. Трендові статистики відповідних критеріїв сформовані на змінному або секційному непересічному вікні аналізу заданої розмірності. Параметром розвитку тренду обрано відношення приросту тренду за час аналізу до СКВ випадкової складової. Для розглянутих трендових критеріїв отримані залежності їх потужності від параметра розвитку тренду і ймовірності помилки першого роду (помилкова тривога), а також оперативні характеристики критеріїв. Аналіз виконано методами аналітичних оцінок і статистичного моделювання. Встановлено, що в разі альтернативи статистики аналізованих критеріїв нормалізуються, а статистика кореляційного критерію свого виду не змінює. Порівняння трендових критеріїв за потужністю при рівних значеннях ймовірності помилки першого роду дозволяє встановити перевагу критерію інверсій, а гірші показники має критерій Вальда-Вольфовітца. Оцінка потужності критеріїв тренду має важливе значення для прикладних застосувань, оскільки дозволяє встановити ймовірність помилки другого роду (пропуск тренду).

Ключові слова: часові ряди; тренд; критерії; потужність критерію; статистичне моделювання; діагностика.

V.F. MYRHOROD, I.M. HVOZDEVA
National University 'Odessa Maritime Academy'

ASSESSMENT OF POWER OF SOME NON-PARAMETRIC TREND CRITERIA

An approach to the selection and comparison of criteria that are used in the analysis of time series of parameters for recording the technical condition of complex technical objects is proposed. The approach is based on established important characteristics of trending criteria, namely the power of such criteria, which are considered as criteria for distinguishing complex hypotheses. For analysis, we propose a statistical model for generating data in the form of a combination of deterministic trend and random components. The deterministic component is considered as a linear approximation of its expansion in a Taylor series. This assumption is justified by the need to identify a trend in the shortest period of time at which the trend component allows a linear approximation. The random component is taken in the form of a sample from the general population of independent random variables that have a normal distribution. For analysis, the most common nonparametric trend criteria were selected: Wald-Wolfowitz criterion; Bartles test; inversion criterion; as well as a parametric correlation criterion for comparison. The support hypothesis has the form of belonging of a time series to a sample from the general set of independent random variables, and an alternative is belonging to a sample with a linear trend. Trend statistics of the relevant criteria are generated on a sliding or sectional disjoint analysis window of a given dimension. The trend development parameter was selected as the ratio of the trend growth during the analysis to the standard deviation of the random component. For the considered trend criteria, the dependences of their power on the trend development parameter and the

probability of an error of the first kind (erroneous alarm), as well as operational characteristics of the criteria, are obtained. The analysis was carried out by methods of analytical estimates and statistical modeling. It has been established that in the case of an alternative, the statistics of the analyzed criteria are normalized, and the statistics of the correlation criterion do not change their type. A comparison of trending power criteria with equal values of the probability of an error of the first kind allows us to establish the advantage of the inversion criterion, and the criterion has the worst performance. Wald-Wolfowitz. Estimating the power of trend criteria is important for applied applications, since it allows you to establish the probability of a second kind of error (skipping a trend).

Keywords: time series; trend criteria; criterion power; statistical modeling; diagnostics.

Постановка проблемы

Выбор трендовых критериев для решения прикладных задач является сложной проблемой, поскольку требования к ним всегда являются противоречивыми. С одной стороны, трендовые критерии должны иметь высокое быстродействие для установления и предупреждения развития аварийных ситуаций. С другой стороны, такие критерии должны иметь высокую достоверность, т.е. минимальное значение вероятности ошибочных решений, которые могут сопровождаться необоснованным снятием диагностируемого объекта из эксплуатации (ошибка первого рода, ошибочная тревога), или пропуском тренда (ошибка второго рода). К сожалению, анализу трендовых критериев относительно ошибок второго рода почти не уделено внимание в известных и опубликованных исследованиях. Но относительная цена такой ошибки (пропуск тренда) может быть довольно высокой, поскольку развитие аварийной ситуации, которая не установлена, может привести к потере объекта диагностирования и другим крайне нежелательным последствиям. С теоретической точки зрения, установление характеристик трендовых критериев относительно вероятности ошибки второго рода является вопросом установления мощности таких критериев, поскольку указанная вероятность является дополнением именно к мощности критерия.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследованию временных рядов и разработке методов их анализа посвящено ряд фундаментальных работ [1–6]. Математические модели процессов изменения параметров технического состояния сложных объектов в виде временных рядов являются предметом ряда прикладных исследований [7–9]. В [10] и других работах школы проф. Лемешко Б.Ю. рассмотрено решение задачи оценки параметров критериев тренда и случайности методом статистического моделирования для ряда частных статистических моделей. Известные преимущества непараметрических критериев обусловили необходимость их детального исследования и сравнительного анализа. Тем не менее, задача оценки мощности различных критериев тренда и случайности еще далека от своего решения. Недостаточно исследованными являются, в частности, вопросы получения оперативных характеристик критериев в зависимости от параметров тренда.

Цель исследования

Целью работы является обоснование подхода к оценке мощности ряда непараметрических трендовых критериев и их сравнительный анализ.

Изложение основного материала исследований

1. Статистическая модель

Общая статистическая модель порождения данных (СМПД) в последующем будет приниматься в виде аддитивной смеси детерминированной и случайной компонент:

$$x_n = f_n + \xi_n, \quad (1)$$

где f_n – детерминированная компонента, $f_n = f(t)_{t=t_n}$ – решетчатая функция некоторой детерминированной непрерывной функции времени, ξ_n – реализация дискретного стационарного случайного процесса (СП).

Частная СМПД с линейным трендом в последующем будет приниматься в виде:

$$x_n = an + \xi_n, \quad (2)$$

где $a = const.$ – темп изменения трендовой компоненты, ξ_n – реализация дискретного СП, которая удовлетворяет гипотезе H_0 – принадлежности к выборке из генеральной совокупности независимых случайных величин (СВ), имеющих нормальное распределение, центрированного и с известной дисперсией $D_\xi = \sigma_\xi^2$.

Детерминированная составляющая рассматривается в виде линейного приближения ее разложения в ряд Тейлора.

Такое допущение обосновывается необходимостью обнаружить тренд на наиболее коротком промежутке времени, на котором трендовая составляющая допускает линейное приближение. Для характеристики соотношения трендовой и случайной компоненты предлагается выбрать коэффициент $k_a = a \cdot N / \sigma_\xi$.

На иллюстрациях рис. 1 и рис. 2 представлены исходные данные. На рисунках обозначены: 1 – трендовая составляющая, 2 – случайная составляющая, 3 – выборка данных.

2. Статистические гипотезы

Сформируем некоторую статистику: дискретный функционал $T(x_k, N)$ на выборках $x_k \in X$, длиной в N отсчетов. На основе статистики сформируем критерий различения гипотез:

$$\left. \begin{array}{l} H_0 : T(x_k, N) \leq C_\alpha \\ H_1 : T(x_k, N) > C_\alpha \end{array} \right\} \quad (3)$$

где C_α – пороговое значение критерия, которое отвечает заданному уровню значимости α .

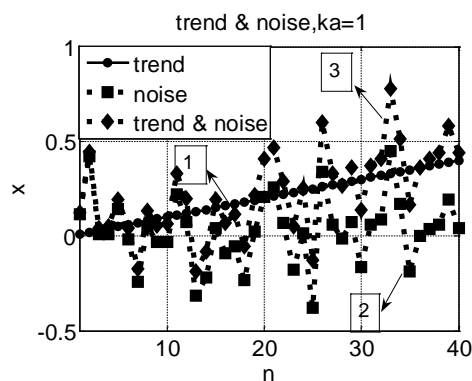


Рис. 1. Выборка данных временного ряда при $k_a = 1$.

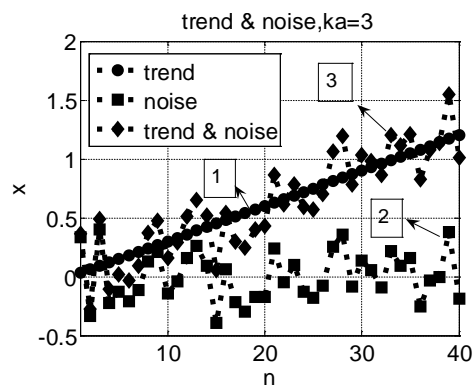


Рис. 2. Выборка данных временного ряда при $k_a = 3$.

Если $p_0(x)$ – функция плотности вероятности решающей статистики, тогда пороговое значение определяется соотношением:

$$\int_{c_\alpha}^{\infty} p_0(T) dT = \alpha.$$

Отбрасывание (опровержение) гипотезы H_0 на заданном уровне значимости отвечает превышение значения решающей статистики порогового уровня. Статистика $T(x_k, N)$ имеет соответствующее распределение (функцию плотности вероятности) и неопровержение H_0 , в том случае, когда она является истиной, дает погрешность первого рода (ошибочную тревогу), вероятность которой равна α .

Отсюда следует ключевой тезис предлагаемого исследования:

Если при статистическом моделировании, или по экспериментальным данным, есть возможность использовать выборки из ансамбля (2), и значения отсчетов решающей статистики $T(x_k, N)$ являются при $\alpha = const$ выборкой из генеральной совокупности независимых СВ с определенной функцией плотности вероятности, причем

$$\begin{aligned} mean(T(x_k, N)) &= const; \\ var(T(x_k, N)) &= const. \end{aligned}$$

тогда априорная опорная гипотеза H_0 должна быть отброшена, а альтернативная гипотеза H_1 принятой как истина. Таким образом, в статистическом эксперименте, или по экспериментальным данным, появляется возможность определить вероятность ошибки второго рода (пропуск тренда) β :

$$\int_{-\infty}^{c_\alpha} p_1(T) dT = \beta,$$

где $p_1(T)$ – функция плотности вероятности решающей статистики для выборки с трендом.

Отсюда $P = 1 - \beta$ является мощностью избранного критерия линейного тренда при заданных темпе a и дисперсии σ_{ζ}^2 на заданном уровне значимости $\alpha = const.$ Квантиль $p_1(T)$, который отвечает вероятности β , одновременно есть квантилем $p_0(T)$, который отвечает $\alpha = const.$ Диаграмма $P = 1 - \beta = f(\alpha, k_a)$ является исчерпывающей оперативной характеристикой избранного критерия относительно СМПД (2), т.е. мощности критерия.

3. Критерии тренда и случайности

3.1. Критерий выборочного коэффициента корреляции.

Статистика выборочного коэффициента корреляции используется для сравнения с анализируемыми непараметрическими критериями.

Статистика выборочного коэффициента корреляции имеет следующий вид:

$$R(x_n, N, k) = \frac{\sum_{n=1}^N [x_n - m(x_n)][x_{n-k} - m(x_{n-k})]}{\sqrt{\sum_{n=1}^N [x_n - m(x_n)]^2 \sum_{n=1}^N [x_{n-k} - m(x_{n-k})]^2}}, \quad (4)$$

где $m(x_n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n$; $m(x_{n-k}) = \frac{1}{N} \sum_{n=k+1}^N x_{n-k}$ – выборочные средние в каждой из секций анализа.

Если $k = 1$, тогда статистика рассчитывается на скользящем окне анализа длиной N . Если $k = N$, статистика рассчитывается на непересекающихся сопредельных окнах анализа. В этом случае гарантируется независимость отсчетов выборок, поскольку в окно анализа не попадают одни и те же самые отсчеты временного ряда.

Статистика ВКК достаточно широко используется для анализа стационарности временного ряда, поскольку ее распределение известно [11]. Сложность аналитического вида такого распределения ограничивает ее применение.

Преобразование Фишера:

$$z(x_n, N) = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - R(x_n, N)}{1 + R(x_n, N)},$$

нормализует статистику ВКК при $N \geq 20$ с параметрами распределения:

$$\begin{aligned} \text{mean}(z(x_n, N)) &\approx \frac{1}{2} \ln \frac{1 - R}{1 + R} + \frac{R}{2(N - 1)}; \\ \text{var}(z(x_n, N)) &\approx \frac{1}{N - 3}. \end{aligned}$$

Статистика ВКК не зависит от способа сортировки исходных данных. Нормализация путем применения преобразования Фишера позволяет упростить формирование критериев различения гипотез, поскольку пороговое значение критерия легко устанавливаются по плотности нормального распределения для заданного уровню значимости.

3.2. Ранговый критерий Вальда-Вольфовитца

Пусть R_i – ранг наблюдения в упорядоченном по возрастанию ряду значений временного ряда. Коэффициент сериальной корреляции Вальда-Вольфовитца имеет вид [12]:

$$R_{ww} = \sum_{i=1}^{N-1} \left(R_i - \frac{N+1}{2} \right) \left(R_{i+1} - \frac{N+1}{2} \right)$$

Распределение статистики для гипотезы H_0 асимптотически нормально со средним $M(R_{ww})$ и дисперсией $D(R_{ww})$, где

$$M(R_{ww}) = 0, D(R_{ww}) = \frac{N^2(N+1)(N-3)(5N+6)}{720}.$$

Гипотеза случайности отклоняется, если

$$|R_{ww}^*| = \frac{R_{ww}}{\sqrt{D(R_{ww})}} > u_{\frac{1+\alpha}{2}}.$$

3.3. Критерий Бартелса

Пусть R_i – ранг наблюдения в упорядоченном по возрастанию ряде значений временного ряда. Статистика рангового критерия проверки случайности анализируемого ряда, предложенного Бартелсом [13], имеет вид

$$R_{ww} = \frac{\sum_{i=1}^N (R_i - R_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^N \left(R_i - \frac{N+1}{2} \right)^2}.$$

Распределение статистики для гипотезы H_0 асимптотически нормально. Гипотеза о случайности отклоняется, если

$$|B^*| = \frac{B-2}{2\sqrt{5/(5N+7)}} > u_{\frac{1+\alpha}{2}}.$$

3.4. Критерий инверсий

Если в выборке значений временного ряда, записанных в порядке их появления, за некоторым значением следует меньшее по величине, тогда имеет место инверсия. Общее число I инверсий в выборке является статистикой критерия случайности полученных значений [14]. Распределение статистики для гипотезы H_0 асимптотически нормально со средним $M(I)$ и дисперсией $D(I)$, где

$$M(I) = \frac{N(N-1)}{4};$$

$$D(I) = \frac{2N^3 + 3N^2 - 5N}{72}.$$

Гипотеза случайности отклоняется, если

$$|I^*| = \frac{|I - M(I)|}{\sqrt{D(I)}} > u_{\frac{1+\alpha}{2}}.$$

Критерий имеет асимптотическую эффективность 0,98 относительно критерия коэффициента регрессии. Следовательно, по эффективности он превосходит большинство непараметрических критериев для тренда.

4. Сравнение трендовых статистик и критериев тренда по мощности

Статистическое моделирование выполнено на выборке длиной в 220 отсчетов временного ряда с окном анализа в 20 отсчетов (скользящим и непересекающимся) на 2000 независимых реализациях.

Наиболее существенным результатом проведенных исследований является подтвержденный путем аналитических оценок и путем статистического моделирования тезис о том, что

- статистика $R(x_n, N)$ характеризуется для СМПД (2) параметрами:

$$\begin{aligned} \text{mean}(R(x_n, N)) &= Q_R; \\ \text{var}(R(x_n, N)) &= \frac{(1 - Q_R^2)^2}{N}; \quad Q_R = \frac{k_a^2}{k_a^2 + 1}. \end{aligned}$$

- функция плотности вероятности статистики $z(x_n, N)$ для СМПД (2) имеет нормальное распределение с параметрами:

$$\text{mean}(z(x_n, N)) = \frac{1}{2} \ln \left(1 + 2 \frac{k_a^2}{k_a^2 + 1} \right); \quad \text{var}(z(x_n, N)) = \frac{1}{\sqrt{N-3}}.$$

- статистики Вальда-Вольфовитца, Бартлеса и инверсий характеризуются следующими параметрами для СМПД (2) при $N = 20$;

$$\begin{aligned} \text{mean}(R_{ww}^*(x_n, N)) &\approx k_a / 2; \quad \text{var}(R_{ww}^*(x_n, N)) \approx \text{const}; \\ \text{mean}(B^*(x_n, N)) &\approx k_a / 2; \quad \text{var}(B^*(x_n, N)) \approx \text{const}; \\ \text{mean}(I^*(x_n, N)) &\approx k_a / 2 + 1; \quad \text{var}(I^*(x_n, N)) \approx \text{const}. \end{aligned}$$

Последнее соотношение справедливо в диапазоне $k_a = 2 \dots 4,5$. Указанные статистики нормализуются при $N = 20$ с доверительной вероятностью 0,95 по критерию χ^2 . Статистическим моделированием получены характеристики обнаружения линейного тренда в выборках, а именно зависимости мощности критериев

при заданном уровне значимости $\alpha = const$. Получены оперативные характеристики критериев, а именно зависимости мощности критериев от уровня значимости при разных значениях параметра тренда. Наиболее существенным заключением по результатам статистического моделирования является нормализуемость трендовых статистик для рассматриваемой СМПД линейного тренда. Поэтому два первых момента таких статистик полностью определяют их свойства при различных параметрах тренда в выборке. Зависимости этих моментов от параметра линейного тренда представлены на Рис. 3 и Рис. 4. На рисунках обозначены: 1 – ВКК, 2 – преобразование Фишера от ВКК, 3 – Вальда-Вольфовитца, 4 – Бартелса, 5 – статистика критерия инверсий

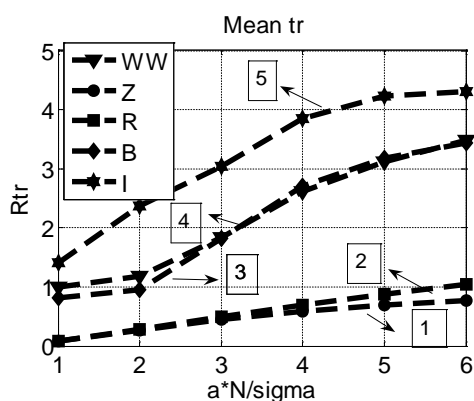


Рис. 3. Зависимость среднего значения статистик от параметра k_a .

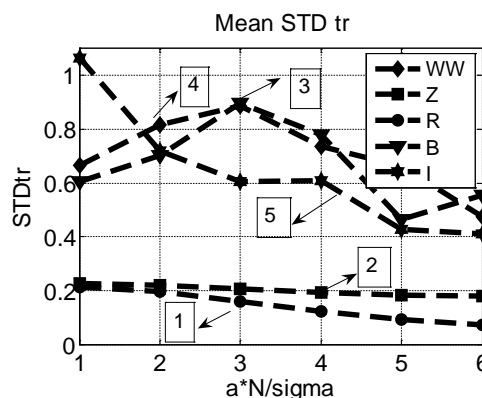


Рис. 4. Зависимость STD статистик от параметра k_a .

Рассмотрим следующие зависимости для каждого из сравниваемых критериев:

- дополнение $P = 1 - \beta = P(k_a)$ к вероятности β ошибки второго рода. Такие зависимости характеризуют мощности сравниваемых критериев для различных параметров линейного тренда и приведены на рис. 5 для $\alpha = 0,95$. На рисунке пунктиром показаны кривые нормальной аппроксимации полученных зависимостей;
- оперативные характеристики критериев: зависимости указанной вероятности от вероятности ошибок первого рода – рис. 6.

На рисунках обозначены: 1 – преобразование Фишера от ВКК, 2 – Вальда-Вольфовитца и Бартелса, 3 – критерий инверсий.

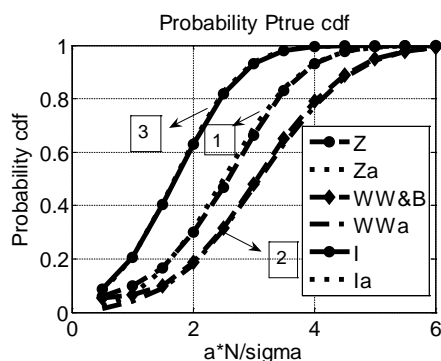


Рис. 5. Зависимость мощности критериев от параметра тренда k_a

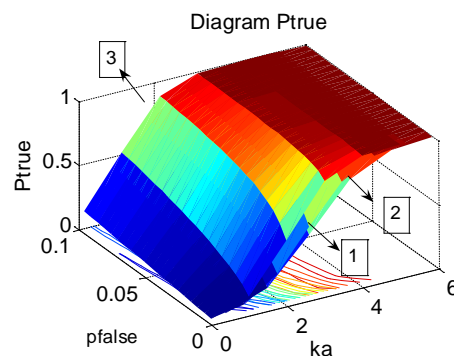


Рис. 6. Оперативные характеристики критериев

Сравнение критериев дает возможность установить следующие результаты.

1. Критерий инверсий позволяет установить наличие тренда с высокой доверительной вероятностью даже при умеренном темпе его развития. Критерии Вальда-Вольфовитца и Бартелса имеют наихудшие характеристики по указанному показателю, а критерий ВКК занимает промежуточное положение.
2. Оперативная характеристика критерия инверсий располагается всегда выше оперативных характеристик критериев ВКК, Вальда-Вольфовитца и Бартелса. Критерий Вальда-Вольфовитца в рамках использованных допущений имеет наихудшую оперативную характеристику.

Таким образом, мощность критерия инверсий, в рамках допущений СМПД (2) и по избранным алгоритмам формирования статистик, существенно превышает мощность критериев Вальда-Вольфовитца и ВКК в диапазоне уровней значимости $\alpha = 0,01 \dots 0,1$ и уровней развития тренда $k_a = 1 \dots 6$. Нужно подчеркнуть, что предлагаемое сравнение имеет важное значение, поскольку условная цена ошибки первого (ошибочная тревога) или второго (пропуск тренда) рода существенно отличаются. В первом случае принятия неверного решения означает необоснованное снятие объекта из эксплуатации и затраты на «outage», а во втором случае – пропуск развития аварийной ситуации и возможная потеря объекта и значительные сопутствующие потери.

Для апробации предлагаемого подхода рассмотрена прикладная задача диагностирования технического состояния маршевой двигательной установки самолета ИЛ-76 с двигателем ПС-90А в процессе длительной эксплуатации, предложенная в [8–9].

На рис. 7 представлена выборка параметров регистрации давления за компрессором, приведенная к диагностической модели, вместе с трендом, полученным методом главных компонент. Иллюстрация на рис. 8 демонстрирует эффективность критерия инверсий.

Численная оценка результатов решения прикладной задачи подтверждает их соответствие предварительным оценкам, полученным в результате статистического моделирования.

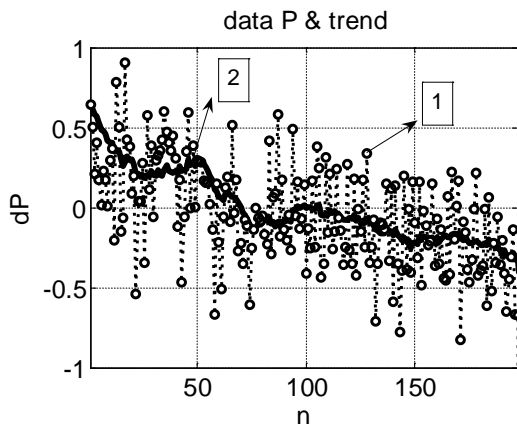


Рис. 7. Выборка данных временного ряда и ее компоненты: 1 – выборка данных, 2 – трендовая составляющая.

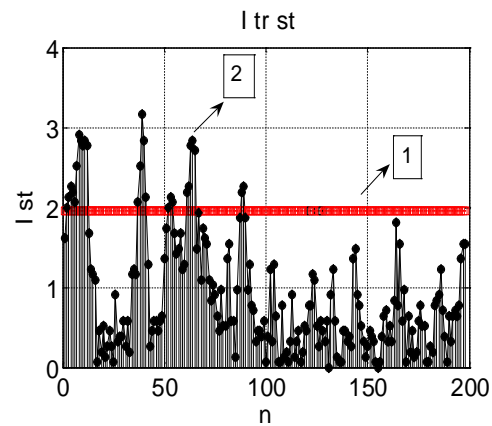


Рис. 8. Изменение значений решающей статистики критерия инверсий: 1 – пороговое значение, 2 – статистика.

Выводы

Предложен подход к оценке мощностей критериев тренда путем введения новой обоснованной статистической модели порождения данных и комплексным применением метода аналитических оценок и статистического моделирования, которое позволяет выполнить обоснованный выбор таких критериев по минимизации вероятности ошибочных решений. Критерии тренда могут сравниваться по разным показателям и предлагаемый подход не является преобладающим, но существенно необходимым.

Всегда будет существовать противоречие между быстродействием критерия и интенсивностью ошибочных решений. Решение такого противоречия может быть найдено в направлении комплексирования критериев, что составляет перспективы дальнейших исследований.

Список использованной литературы

1. Kendall M., Stuart A. The Advanced Theory of Statistics. Vol. 2. New York: Hafner, 1979. 748 p.
2. Anderson O. D. Time Series Analysis and Forecasting. London: Butterworths, 1976. 182 p.
3. Box G. E. P., Jenkins G. M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. San Francisco: Holden Day, 1976. 575 p.
4. Montgomery D. C., Johnson L. A., Gardiner J. S. Forecasting and Time Series Analysis. New York: McGraw-Hill, 1990. 381 p.
5. Shumway R. H. Applied Statistical Time Series Analysis. New York: Prentice Hall, 1988. 384 p.
6. Wei W. W. Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods. New York: Addison-Wesley, 1989. 640 p.
7. Hvozdeva I., Myrhorod V., Derenh Y. The Method of Trend Analysis of Parameters Time Series of Gas-turbine Engine State. Proceedings of the *AMiTaNS'17*: AIP Conference. Vol. 1895. (Bulgaria, Albena, June 21–26, 2017), Melville, New York: American Institute of Physics, 2017. P. 030002-1-030002-9. DOI: 10.1063/1.5007361

8. Myrhorod V., Hvozdeva I., Demirov V. Some Interval and Trend Statistics with Non-Gaussian Initial Data Distribution. Proceedings of the *AMiTaNS'18: AIP Conference*. Vol. 2025. (Bulgaria, Albena, June 20–25, 2018), Melville, New York: American Institute of Physics, 2018. P. 040011-1-040011-12, DOI: 10.1063/1.5064895
9. Myrhorod V., Hvozdeva I., Derenh Y. Two-Dimensional Trend Analysis of Time Series of Complex Technical Objects Diagnostic Parameters. Proceedings of the *AMiTaNS'19:11th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences*. Vol. 2164, №1. (Bulgaria, Albena, June 20–25, 2019), Melville, New York: American Institute of Physics, 2019. P. 040011-1–040011-12, DOI: 10.1063/1.5130815
10. Veretenikova I.V., Lemeshko B. Criteria of Test against Absence of Trend in Dispersion Characteristics. Proceedings of the *IFOST 2016: The 11th International Forum on Strategic Technology*. (Rossia, Novosibirsk, June 1-3, 2016), Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016. P. 333–337.
11. Korn G. A., Korn T. M. *Mathematical Handbook*. Mineola, New York, 2000. 1132 p.
12. Wald A., Wolfowitz J. An Exact Test for Randomness in the Non-Parametric Case Based on Serial Correlation. *AMS*. 1943. V. 14. P. 378–388.
13. Bartels R. The Rank Version of von Neumann's Ratio Test for Randomness. *Journal of the American Statistical Association*. 1982. Vol. 77. № 377. P. 40–46.
14. Himmelblau D. M. *Process Analysis by Statistical Methods*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1970. 463 p.

References

1. Kendall, M., & Stuart, A. (1979). *The Advanced Theory of Statistics*. Vol. 2. New York: Hafner.
2. Anderson, O. D. (1976). *Time Series Analysis and Forecasting*. London: Butterworths.
3. Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. (1976). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco: Holden Day.
4. Montgomery, D. C., Johnson, L. A., & Gardiner, J. S. (1990). *Forecasting and Time Series Analysis*. New York: McGraw-Hill.
5. Shumway, R. H. (1988). *Applied Statistical Time Series Analysis*. New York: Prentice Hall.
6. Wei, W. W. (1989). *Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods*. New York: Addison-Wesley.
7. Hvozdeva, I., Myrhorod, V., & Derenh, Y. (2017). The Method of Trend Analysis of Parameters Time Series of Gas-turbine Engine State. Proceedings of the *AMiTaNS'17: AIP Conference*. Vol. 1895. (Bulgaria, Albena, June 21–26, 2017), Melville, New York: American Institute of Physics, pp. 030002-1-030002-9. DOI: 10.1063/1.5007361
8. Myrhorod, V., Hvozdeva, I., & Demirov, V. (2018). Some Interval and Trend Statistics with Non-Gaussian Initial Data Distribution. Proceedings of the *AMiTaNS'18: AIP Conference*. Vol. 2025. (Bulgaria, Albena, June 20–25, 2018), Melville, New York: American Institute of Physics, pp. 040011-1-040011-12, DOI: 10.1063/1.5064895
9. Myrhorod, V., Hvozdeva, I., & Derenh, Y. (2019). Two-Dimensional Trend Analysis of Time Series of Complex Technical Objects Diagnostic Parameters. Proceedings of the *AMiTaNS'19:11th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences*. Vol. 2164, №1. (Bulgaria, Albena, June 20–25, 2019), Melville, New York: American Institute of Physics, pp. 040011-1–040011-12, DOI: 10.1063/1.5130815

10. Veretenikova, I.V., & Lemeshko, Б. (2016). Criteria of Test against Absence of Trend in Dispersion Characteristics. Proceedings of the *IFOST 2016: The 11th International Forum on Strategic Technology*. (Russia, Novosibirsk, June 1-3, 2016), Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, pp. 333–337.
11. Korn, G. A., & Korn, T. M. (2000). *Mathematical Handbook*. Mineola, New York.
12. Wald, A., & Wolfowitz, J. (1946). An Exact Test for Randomness in the Non-Parametric Case Based on Serial Correlation. *AMS*. **14**, 378–388.
13. Bartels, R. (1982). The Rank Version of von Neumann's Ratio Test for Randomness. *Journal of the American Statistical Association*. **77**, 377, 40–46.
14. Himmelblau, D. M. (1970). *Process Analysis by Statistical Methods*. New York: John Wiley and Sons, Inc.

Миргород Владимир Федорович – д.т.н., доцент, профессор кафедры автоматизации судовых энергетических установок Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: v.f.mirgorod@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8361-1672.

Гвоздева Ирина Маратовна – д.т.н., профессор, профессор кафедры электрооборудования и автоматики судов Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: onopchenko.im@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5797-0559.

УДК 62.50:531.383

С.І. ОСАДЧИЙ, М.М. ДЯЧЕНКО
Центральноукраїнський національний технічний університет

ЗБІР ТА ПЕРВИННА ОБРОБКА ДАНИХ З СИСТЕМИ ARDUPILOT ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ КВАДРОКОПТЕРУ

Обґрунтовано необхідність первинної обробки експериментальних даних польоту квадрокоптера, які отримані від системи Ardupilot або аналогічної до неї системи. Головними причинами виникнення необхідності є послідовний характер опитування та реєстрації сигналів від сенсорів, а також різний принцип вимірювання, використаний у них. Мета обробки – синхронізація відліків у записах сигналів та приведення результатів виміру синхронізованих даних до зв'язаної з об'єктом системи координат.

На основі літературних джерел та в результаті експерименту показана можливість вважати вектори сигналів, які характеризують рухи квадрокоптера у режимі зависання, векторами стаціонарних випадкових процесів. Розроблено алгоритм застосування методу взаємної кореляційної функції для синхронізації відліків у множині експериментальних даних. Суть алгоритму полягає у визначенні величини запізнення одного сигналу по відношенню до іншого та використанні величини запізнення для визначення синхронних номерів відліків у записах.

Доведено, що апаратура Ardupilot дозволяє отримувати експериментальні дані, які необхідні для ідентифікації моделі динаміки квадрокоптера, яка характеризує його динаміку відносно зв'язаної системи координат, оскільки дозволяє знайти координати одного вектора відносно двох систем координат.

Представлено алгоритм однозначного визначення матриці переходу за відомим з експерименту векторами прискорень центру мас квадрокоптера відносно зв'язаної з ним системи координат та вектора швидкості руху центру мас квадрокоптера відносно поверхні Землі. Основу алгоритму складає метод визначення кватерніону миттєвого повороту літального апарату, як власного вектора, який відповідає максимальному власному значенню спеціальним чином визначеної числової матриці.

Ключові слова: синхронізація; взаємна кореляційна функція; кватерніон; матриця переходу; власний вектор.

С.И. ОСАДЧИЙ, М.Н. ДЯЧЕНКО
Центральноукраинский национальный технический университет

СБОР И ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ИЗ СИСТЕМЫ ARDUPILOT ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ КВАДРОКОПТЕРА

Обоснована необходимость первичной обработки экспериментальных данных полета квадрокоптера, полученных от системы Ardupilot или аналогичной ей системы. Главными причинами возникновения необходимости является последовательный характер опроса и регистрации сигналов от сенсоров, а также разный принцип измерения, использованный в них. Цель обработки - синхронизация отсчетов в записях сигналов и приведение результатов измерения синхронизированных данных к связанной с объектом системе координат.

На основе литературных источников и в результате эксперимента показана возможность считать векторы сигналов, характеризующих движения квадрокоптера в режиме зависания, векторами стационарных случайных процессов. Разработан алгоритм применения метода взаимной корреляционной функции для синхронизации

отсчетов множества экспериментальных данных. Суть алгоритма заключается в определении величины задержки одного сигнала по отношению к другому и использовании величины задержки для определения номеров синхронных отсчетов в записях.

Доказано, что аппаратура Ardupilot позволяет получать экспериментальные данные, которые необходимы для идентификации модели динамики квадрокоптера, характеризующей его динамику относительно связанной системы координат, поскольку позволяет измерить координаты одного вектора относительно двух систем координат.

Представлен алгоритм однозначного определения матрицы перехода по известным из эксперимента вектора ускорений центра масс квадрокоптера относительно связанной с ним системы координат и вектора скорости движения центра масс квадрокоптера относительно поверхности Земли. Основу алгоритма составляет метод определения кватернионов мгновенного поворота летательного аппарата, как собственного вектора, соответствующего максимальному собственному значению специальным образом определенной числовой матрицы.

Ключевые слова: синхронизация; взаимная корреляционная функция; кватернион; матрица перехода; собственный вектор.

S.I. OSADCHY, M. M. DJACHENKO
Central Ukraine National Technical University

ACQUISITION AND PRIMARY PROCESSING OF DATA FROM THE ARDUPILOT SYSTEM FOR IDENTIFICATION OF THE QUADROCOPTER DYNAMICS MODEL

The necessity of the quadcopter flight experimental data received from the Ardupilot system or a similar system primary processing is substantiated. The sequential nature of signals polling and registration from sensors, as well as the different measurement principles used in them are the main reasons for the emergence of this necessity. The processing purpose is to synchronize the samples in the signal records and bring the measurement results of the synchronized data to the coordinate system associated with the object.

On the basis of literature sources and as a result of the experiment, it is shown that it is possible to consider the signal vectors characterizing the motion of the quadcopter in hovering mode as vectors of stationary random processes. An algorithm for applying the method of cross-correlation function to synchronize the counts of a set of experimental data has been developed. The essence of the algorithm is to determine the delay of one signal in relation to another and use the delay to determine the numbers of synchronous samples in the records. It is proved that the Ardupilot hardware allows you to obtain experimental data that are necessary to identify the quadcopter dynamics model, which characterizes its dynamics relative to a linked coordinate system, since it allows you to measure the coordinates of one vector relative to two coordinate systems.

An algorithm for the unambiguous determination of the transformation matrix using the vector of relative to the associated coordinate system quadcopter center mass accelerations and the vector of relative to the Earth's surface quadcopter center mass velocities is presented. The algorithm is based on the method for determining the quaternions of instantaneous rotation of the aircraft as an eigenvector corresponding to the maximum eigenvalue of a specially defined numerical matrix.

Keywords: synchronization; cross correlation function; quaternion; transformation matrix; eigenvector.

Постановка проблеми

Успіх у розробці та впровадженні оптимального закону керування [1–2] залежить від наявності моделі динаміки об'єкта, яка задовольняє суперечливим вимогам. По-перше, модель повинна коректно відображати процеси, які виникають в об'єкті в реальних умовах функціонування. По-друге, вона повинна мати найбільш просту структуру. По-третє, модель повинна зв'язувати фізичні параметри, які характеризують динаміку об'єкта відносно однієї зв'язаної з ним системи координат. Одним з найбільш успішних шляхів задовольнити цим вимогам [1, 3] є ідентифікація моделі динаміки об'єкту керування на основі даних про зміну його вхідних та вихідних сигналів, отриманих експериментально.

Квадрокоптер, як відомо зі статей [4–6], належить до множини багатовимірних нелінійних рухомих об'єктів керування, які функціонують в умовах дії стохастичних корисних сигналів, збурень та завад. Вимір та запам'ятовування сигналів «вхід-вихід» на борту квадрокоптера здійснюється шляхом послідовного опитування інтелектуальних сенсорів, які як правило здійснюють вимір фізичних величин відносно різних систем відліку.

Таким чином, ідентифікація лінеаризованої моделі динаміки вимагає розв'язання наступного завдання.

За записами сигналів керування швидкістю обертання гвинтів квадрокоптера та сигналів, що характеризують його рух, типом та принципом роботи сенсорів, а також характеристиками апаратури запам'ятовування здійснити синхронізацію значень записаних сигналів та приведення їх до зв'язаної з квадрокоптером системи координат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як видно з постановки завдання, дослідження зводиться до розв'язання двох задач. Розгляд публікацій, присвячених збору експериментальних даних про польоти квадрокоптерів, наприклад [6] показав, що в більшості випадків автори нехтують часовими затримками між відліками різних сигналів, які виникають внаслідок послідовного опитування сенсорів. Таке нехтування цілковито обґрунтоване в разі, коли дані з експерименту використовують лише для аналізу точності витримання траєкторії. В той же час, зазначене нехтування є некоректним при використанні записів сигналів для подальшої ідентифікації. Аналіз методів синхронізації сигналів [7–8] дозволив поділити їх на дві групи: з використанням додаткового сигналу та без використання. Оскільки сигнали в контурах керування польотом квадрокоптера належать до множини випадкових сигналів, то для розв'язання задачі синхронізації використано метод взаємної кореляційної функції з підручника [8].

Задача приведення даних виникла при обґрунтуванні вигляду системи диференціальних рівнянь квадрокоптера як об'єкта керування [4–6]. Для її розв'язання традиційно використовують кути Ейлера-Крилова та відповідну матрицю переходу від нерухомого базису, зв'язаного з Землею, до рухомого, який зв'язаний з корпусом квадрокоптера. Суттєвим недоліком даного підходу є залежність вигляду матриці переходу від послідовності елементарних кутових поворотів квадрокоптера. Як доведено у монографії [9] будь-який літальний апарат здійснює еволюції шляхом повтору на один кут навколо миттєвої вісі обертання, тому визначити елементарні повороти досить складно. В той же час, відома робота [9], де представлено підхід, який дозволяє однозначно визначити кватерніон повороту твердого тіла [10] за виміром одного вектора відносно двох систем координат.

Отже, мета досліджень може бути сформульована наступним чином.

Мета дослідження

Розробити правила та алгоритми обробки записів компонентів векторів сигналів «вхід-вихід» квадрокоптера отриманих з допомогою мікропроцесорної апаратури реєстрації польотної інформації типу ARDUPILOT, які дозволять отримати експериментальні данні для ідентифікації моделі динаміки квадрокоптера у режимі зависання за рахунок синхронізації записів компонентів векторів та приведення їх до зв'язаної системи координат.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналіз системи забезпечення польоту квадрокоптера показав, що даний літальний апарат у польоті функціонує у замкненій системі автоматичного керування (рис. 1).

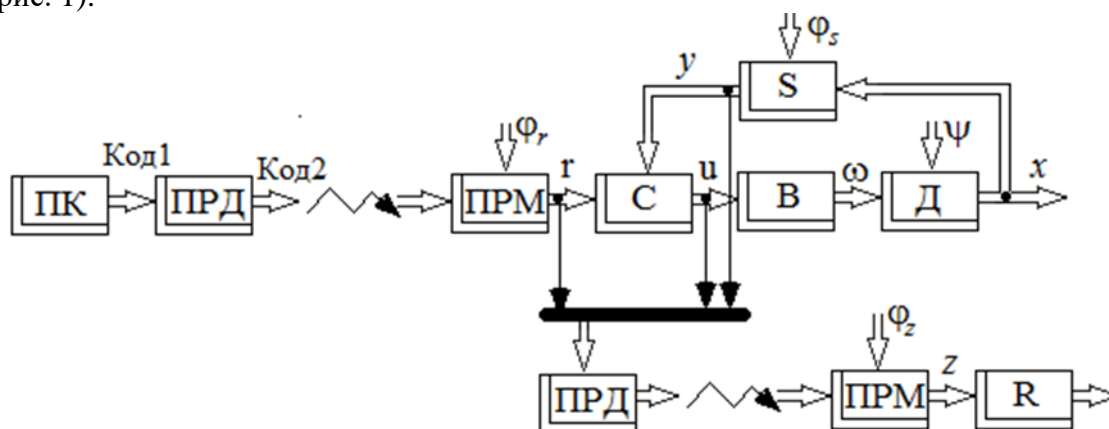


Рис. 1. Система автоматичного керування польотом квадрокоптера.

Команда оператора подається на вхід пульта керування ПК, де відбувається її перетворення з руху органу керування у електричний сигнал з подальшим кодуванням та передачею вектора сигналів на вхід передавача ПРД. Передавач разом з приймачем ПРМ утворюють канал передачі даних, призначений для зв'язку ПК з контролером С. З виходу ПРМ на вхід С подається вектор програмних сигналів r

$$r = \left[\gamma_3 \quad J_3 \quad \psi_3 \quad \varphi_{g3} \quad \lambda_{g3} \quad H_{uz} \quad V_{y3} \quad \dot{X}_{N3} \quad \dot{Y}_{E3} \quad \ddot{X}_{N3} \quad \ddot{Y}_{E3} \right]', \quad (1)$$

де γ_3 – задане значення кута крену; ϑ_3 – задане значення кута тангажу; ψ_3 – задане значення кута рискання; φ_{g3} – задане значення широти; λ_{g3} – задане значення довготи; H_{uz} – задане значення дійсної висоти польоту; V_{y3} – задана вертикальна швидкість дрону; \dot{X}_{N3} – задана швидкість руху вздовж напрямку на Північ, \dot{Y}_{E3} – задана швидкість руху вздовж напрямку на Схід; \ddot{X}_{N3} – задане прискорення руху на Північ; \ddot{Y}_{E3} – задане прискорення руху на Схід; індекс / – позначає транспонування. Вектор r є образом програми заданої оператором, оскільки ця програма спотворена шумом передачі φ_r .

У контролері С відбувається порівняння вектора r з вектором вимірних сигналів y . Вектор вимірних сигналів має наступну структуру

$$y = \left[\gamma \quad J \quad \psi \quad \varphi \quad \lambda \quad H_u \quad V_y \quad W \quad A_x \quad A_y \quad A_z \right]', \quad (2)$$

де γ – поточне значення кута крену; ϑ – поточне значення кута тангажу; ψ – поточне значення кута рискання; V_y – вертикальна швидкість дрону; H_u – значення дійсної висоти польоту (від фільтру Калмана); φ – широта від GPS; λ – довгота від GPS; W – швидкість вздовж вісі x відносно поверхні Землі; A_x – прискорення руху вздовж вісі Ox ; A_y – прискорення руху вздовж вісі Oy ; A_z – прискорення руху вздовж вісі Oz ; φ – значення широти; λ – значення довготи. Вектор u є образом вектора вихідних координат дрону x (рис. 1), оскільки цей вектор спотворений шумом вимірювання φ_s .

На основі такого порівняння формується вектор сигналів керування u

$$u = [c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4]^T, \quad (3)$$

де c_1, c_2, c_3, c_4 – сигнали, які подаються на вхід регуляторів обертів двигунів гвинтів квадрокоптера.

Компоненти цього вектора є цілими числами, що визначають частоти обертання моторів вентиляторів квадрокоптера, які утворюють вектор ω . Зміна частоти обертання вентиляторів викликає зміну рівнодіючих сил $U_1 - U_3$, моментів $\tau_1 - \tau_4$ та як наслідок веде до зміни компонентів вектора вихідних сигналів x . Компоненти вектора x вимірюються з допомогою сенсорів S . Процес вимірювання супроводжується похибками, які утворюють вектор шуму вимірювання φ_s . Збір вимірювальної інформації про вектори «вхід-вихід» квадрокоптера здійснюється з допомогою реєстратору R , на вхід якого подається вектор z сигналів отриманих на виході приймача.

Аналіз графіків зміни компонентів векторів (1)–(3), приклади яких наведені у роботі [6], показує, що зазначені компоненти допустимо вважати стаціонарними випадковими функціями часу.

Оскільки заповнення компонентів вектора z відбувається послідовно та займає певний час, то між відліками різних компонентів виникає запізнення. Значення запізнення залежить від порядку опитування сенсорів та є різним між різними сигналами. Таким чином, задача синхронізації зводиться до оцінювання запізнення та компенсації його.

Основа для визначення запізнення складає метод заснований на отриманні оцінки взаємної кореляційної функції двох стаціонарних взаємозв'язаних випадкових процесів. У роботі [8] доведено, що в разі коли задані два стаціонарні взаємозв'язані випадкові процеси, між якими відсутня затримка, то максимум оцінки їх взаємної кореляційної функції співпадає з початком координат. При появі затримки максимум зміщується відповідним чином. При цьому величина затримки визначається абсцисою максимуму взаємної кореляційної функції. Отже, для визначення часу запізнення необхідно виконати наступні дії:

- з запису вектора z (рис. 1) виділити пару масивів, наприклад c_1 та γ ;
- знайти оцінку взаємної кореляційної функції між цими масивами, наприклад $K_{c_1 \gamma}(\tau)$;
- визначити ординату максимуму цієї оцінки, наприклад $\tau_{c_1 \gamma}$.

Результат виконання представленого алгоритму дозволив визначити, що час запізнення між сигналом керування c_1 та кутом крену γ складає

$$\tau_{c_1 \gamma} = 0.9, \text{ с.}$$

Компенсація запізнення здійснюється шляхом зсуву однієї вибірки значень сигналу відносно іншої на кількість відліків n_τ , яка визначається очевидно з рівняння

$$n_\tau = \frac{\tau}{\Delta t}, \quad (4)$$

де τ – час запізнення одного сигналу по відношенню до іншого; Δt – крок дискретизації за часом.

Рух центру мас квадрокоптера відносно поверхні Землі характеризують наступні сигнали: $H_u, V_y, \varphi_g, \lambda_g, W, \dot{X}_N, \dot{Y}_E, A_x, A_y, A_z$, однак вимір їх значень здійснюється відносно різних систем координат. Отже виникає необхідність приведення сигналів до єдиної зв'язаної з квадрокоптером системи координат Основу для такого приведення складає матриця переходу $A(\lambda)$.

З багатьох літературних джерел [10, 11] відомо, що вигляд цієї матриці залежить від кутів γ, ϑ, ψ , однак така залежність є неоднозначною [11]. Враховуючи те, що сигнали про зміну кутів γ, ϑ, ψ вимірюються з допомогою бортового обладнання, а також є можливість виміру двох векторів прискорень центру мас квадрокоптера

$$k = [A_x \ A_y \ A_z]^T, \quad m = [\ddot{X}_N \ \ddot{Y}_E \ \dot{V}_y]^T,$$

задача розрахунку матриці направляючих косинусів формулюється наступним чином. За відомими векторами k та m знайти матрицю $A(\lambda)$.

У відповідності з джерелом [9], якщо існують два вектори k та m , які зв'язані співвідношенням

$$k = A(\lambda)m,$$

де A – матриця переходу; λ – вектор параметрів Родріга-Гамільтона (кватерніон)

$$\lambda = [\lambda_0 \ \lambda_1 \ \lambda_2 \ \lambda_3]^T, \quad (5)$$

тоді при відомому векторі λ значення матриці A може бути однозначно визначене.

В монографії [9] доведено, що в разі точного виміру векторів k та m вектор λ є власним вектором числової матриці $K(m, k)$, який відповідає власному значенню цієї матриці, що дорівнює $\alpha_m \alpha_k$, у якому константа α_m визначається як квадрат другої норми вектора m

$$\alpha_m = \|m\|^2 = m^T m, \quad (6)$$

а константа α_k дорівнює

$$\alpha_k = k^T k. \quad (7)$$

При цьому матриця K повинна бути визначена як

$$K(m, k) = \begin{bmatrix} 0 & -m \\ m & V(m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & k \\ -k & V(k) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де індекс / – знак транспонування; $V(x)$ – кососиметрична матриця компонентів вектора x

$$V(x) = \begin{bmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Оскільки, під час польоту відбувається безперервна зміна кутового положення квадрокоптера, навіть у режимі зависання, то завдання приведення координат необхідно розв'язувати для кожного моменту часу. З цієї причини для розв'язання задачі приведення необхідно визначити множину матриць переходу, кожен елемент якої відповідає фіксованому моменту часу. Отже, в процесі обробки запису вектора z необхідно виконати наступні дії:

- зафіксувати номер відліку значення вектора z знайти вектори k, m ;
- визначити норми (6), (7) та знайти їх добуток;
- побудувати тензори $V(k)$ та $V(m)$ за правилом (9);
- знайти числову матрицю $K(m, k)$ як добуток (8);
- визначити власний вектор матриці $K(m, k)$ λ , який відповідає власному значенню, знайденому на другому етапі;
- здійснити формування матриці переходу $A(\lambda)$;
- змінити номер відліку та повторити алгоритм.

Знайдена таким чином множина матриць переходу дозволить привести сигнали сенсорів до однієї зв'язаної з квадрокоптером рухомої системи координат та як наслідок отримати експериментальні дані необхідні для ідентифікації динаміки такого літального апарату.

Висновки

Дослідження, результати яких представлені у статті, доводять, що для забезпечення ідентифікації моделі динаміки квадрокоптера, яка зв'язує фізичні параметри відносно однієї системи координат, доцільно здійснити синхронізацію експериментальних даних методом взаємної кореляційної функції та визначити множину матриць переходу з допомогою множини кватерніонів, знайдених методом виміру одного вектора у двох системах координат.

Список використаної літератури

1. Азарсков В. Н., Блохин Л. Н., Житецкий Л. С. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации: монография. Киев: Книжное издательство Национального авиационного университета, 2006. 440с.
2. Блохин Л. Н., Осадчий С. И., Дидык А. К., Рудюк Г. И. Технологии конструирования современных конкурентоспособных комплексов управления стохастическим движением объектов: монография. Кировоград: издатель – Лисенко В.Ф., 2015. 284 с.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т.2: Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления. Под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. Москва: Издательство МГТУ им. Баумана, 2004. 640 с.
4. Огольцов И. И., Рожнин Н. Б., Шеваль В. В. Разработка математической модели пространственного полета квадрокоптера. *Труды МАИ*. 2015. № 83. С. 41–67.

5. Bristeau P.-J., Callou F., Vissiere D., Petit N. The Navigation and Control Technology Inside the AR.Drone Micro UAV. *18th IFAC World Congress*. (Italy, Milano, August 28-September 2, 2011), pp. 1477–1484.
6. Hoffmann G. M., Huang H., Waslander S. L., Tomlin C. J. Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment. *AIAA Guidance, Navigation and Control: Conference and Exhibit* (USA, South Carolina, Hilton Head, August 20-23, 2007), pp. 1–20.
7. Шахтарин Б. И. и др. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации. Москва: Горячая линия-Телеком, 2011. 256 с.
8. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. Москва: Книга по Требованию, 2012. 541 с.
9. Науменко К.И. Наблюдение и управление движением динамических систем: монография. Киев: Наукова думка, 1984. 208 с.
10. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. Москва: Наука, 1973. 320 с.
11. Ишлинский А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. Москва: Наука, 1976. 672 с.

References

1. Azarskov, V. N., Blokhyn, L. N., & Zhytetskyi, L. S. (2006). Metodolohyia konstruyrovanyia optymalnykh system stokhastycheskoi stabylyzatsyy: monohrafiya. Kyev: Knyzhnoe izdatelstvo Natsionalnogo aviatsionnogo universiteta.
2. Blokhyn, L. N., Osadchyi, S. Y., Dydyk, A. K., & Rudiuk, H. Y. (2015). Tekhnolohyy konstruyrovanyia sovremennykh konkurentosposobnykh kompleksov upravlenyia stokhastycheskym dvyzhenyem ob`ektov: monohrafiya. Kyrovohrad: Izdatel – Lysenko V.F.
3. Pupkova, K. A., & Ehupova, N. D. (2004). Metod klassycheskoi y sovremennoi teoryy avtomatycheskoho upravlenyia (2nd ed.). Moskva: Izdatelstvo MHTU im. Baumana.
4. Oholtsov, Y. Y., Rozhnyn, N. B., & Sheval, V. V. (2015). Razrabotka matematycheskoi modely prostranstvennogo poleta kvadropera. *Trudy MAY*. **83**, 41-67.
5. Bristeau, P. J., Callou, F., Vissiere, D., & Petit, N. (2011). The Navigation and Control Technology Inside the AR.Drone Micro UAV. *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*. (Italy, Milano, August 28-September 2, 2011), pp. 1477–1484.
6. Hoffmann G. M., Huang H., Waslander S. L., & Tomlin C. J. (2007). Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment. *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control: Conference and Exhibit* (USA, South Carolina, Hilton Head, August 20-23, 2007), pp. 1–20.
7. Shakhtaryn, B. Y. (2011). Synkhronyzatsyia v radyosvyazy y radyonavyhatsyy. Moskva: Horiachaia lynyia-Telekom.
8. Bendat Dzh., Pyrsol A. (2012). Prykladnoi analiz sluchainykh dannykh. Moskva: Knyha po Trebovaniyu.
9. Naumenko, K. Y. (1984) Nabliudenyie y upravlenyie dvyzhenyem dynamycheskykh system: monohrafiia. Kyev: Naukova dumka.
10. Branets, V. N., & Shmyhlevskiyi ,Y. P. (1973). Prymenenyie kvaternyonov v zadach oryentatsyy tverdoho tela. Moskva: Nauka.
11. Yshlynskyi A. Iu. (1976). Oryentatsyia, hyroskopy i inertsyalnaia navyhatsyia. Moskva: Nauka.

Осадчий Сергій Іванович – д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, e-mail: srg2005@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1811-3594

Дяченко Максим Миколайович – аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету, e-mail: mr.frost201611@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6833-6593

УДК 621.382

О.В. ОСАДЧУК, Л.В. КРИЛИК, Я.О. ОСАДЧУК
Вінницький національний технічний університет**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА
ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ**

Розроблено математичну модель частотного параметричного перетворювача вологості з ємнісними елементами виготовленими на основі: NaCl+полімер, NaCl; BaCl₂+полімер, BaCl₂, а також ємнісних елементів виготовленими на основі комплексних сполук. Параметричний перетворювач вологості з частотним виходом розроблено на основі біполярної транзисторної структури, що утворює активну індуктивність з динамічним від'ємним опором, яка з вологочутливим конденсатором C_W утворює коливальний контур перетворювача. Математичне моделювання та експериментальні дослідження показали, що в діапазоні відносної вологості від 30 % до 100 %, діапазон зміни ємності для вологочутливого елемента на основі NaCl становить від $0,030 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф, а для двошарової структури на основі NaCl+полімер – від $0,125 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф. Для вологочутливого елемента на основі BaCl₂ – діапазон зміни ємності становить від $0,060 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф, а для двошарової структури на основі BaCl₂+полімер – від $0,130 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф. На основі експериментальних досліджень встановлено, що на чутливість сенсора впливає склад комплексних сполук, а саме найчутливішим в діапазоні вологості від 7 % до 27 % є ємнісний елемент виготовлений на основі гетерометалевої комплексної сполуки II, яка містить два атома стибію. Чутливість такого ємнісного елемента набуває значення 285 пФ/%. Залежність ємності від відносної вологості, в діапазоні від 30 % до 75 %, практично лінійна, а чутливість дорівнює 135 пФ/%. В діапазоні 75...95 % спостерігається різке зростання чутливості аж до 450 пФ/% для всіх ємнісних елементів виготовлених на основі гетерометалевих комплексних сполук I – IV. На основі математичного моделювання отримано графічні залежності функції перетворення та чутливості частотного параметричного перетворювача вологості. Найбільша чутливість частотного параметричного перетворювача вологості для зміни вологості навколишнього середовища становить 62...107 кГц/%.

Ключові слова: частотний перетворювач вологості; вологочутливий ємнісний елемент; від'ємний диференційний опір; функція перетворення; рівняння чутливості.

А.В. ОСАДЧУК, Л.В. КРИЛИК, Я.А. ОСАДЧУК
Вінницький національний технічний університет**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
ВЛАЖНОСТИ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ**

Разработана математическая модель частотного параметрического преобразователя влажности с емкостными элементами изготовленными на основе: NaCl + полимер, NaCl; BaCl₂ + полимер, BaCl₂, а также емкостных элементов изготовленных на основе комплексных соединений. Параметрический преобразователь влажности с частотным выходом разработан на основе биполярной транзисторной структуры, что образует активную индуктивность с динамическим отрицательным сопротивлением, которая с влагочувствительным конденсатором образует колебательный контур преобразователя. Математическое моделирование и экспериментальные исследования показали, что в диапазоне относительной

влажності от 30% до 100%, діапазон змінення ємкості для вологочувствительного елемента на основі NaCl складає от $0,030 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф, а для двохслойної структури на основі NaCl+полімер – от $0,125 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф. Для вологочувствительного елемента на основі BaCl₂ – діапазон змінення ємкості складає от $0,060 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф, а для двохслойної структури на основі BaCl₂+полімер – от $0,130 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф. на основі експериментальних досліджень встановлено, що на чутливість сенсора впливає склад комплексних сполучень, а іменно чутливого в діапазоні вологості от 7% до 27% являється ємкостний елемент, котрий виготовлено на основі гетерометаллического комплексного сполучення II, містить два атома сурьми. Чутливість такого ємкостного елемента має значення 285 пФ/%. Залежність ємкості от відносної вологості в діапазоні от 30% до 75%, практично лінійна, а чутливість рівна 135 пФ/%. В діапазоні 75...95% спостерігається різкий ріст чутливості до 450 пФ/% для всіх ємкостних елементів, виготовлених на основі гетерометаллических комплексних сполучень I - IV. На основі математичного моделювання отримано графічні залежності функції перетворення і чутливості частотного параметричного перетворювача вологості. Найбільша чутливість частотного параметричного перетворювача вологості от змінення вологості оточуючої середовища складає 62...107 кГц/‰.

Ключеві слова: частотний перетворювач вологості; вологочувствительний ємкостний елемент; від'ємне дифференціальне спротивлення; функція перетворення; рівняння чутливості.

A.V. OSADCHUK, L.V. KRILIK, I.A. OSADCHUK
Vinnytsia National Technical University

MATHEMATICAL MODEL OF A PARAMETRIC HUMIDITY TRANSDUCER WITH A FREQUENCY OUTPUT

A mathematical model of a frequency parametric humidity transducer with capacitive elements based on: NaCl+polymer, NaCl; BaCl₂+polymer, BaCl₂, as well as capacitive elements based on complex compounds. A parametric humidity transducer with a frequency output is developed on the basis of a bipolar transistor structure, which forms an active inductance with dynamic negative resistance, which forms an oscillatory circuit of the transducer with a humidity-sensitive capacitor. Mathematical modeling and experimental studies have shown that in the range of relative humidity from 30 % to 100 %, the range of capacitance change for a humidity sensitive element based on NaCl is from $0.030 \cdot 10^{-8}$ F to $3.9 \cdot 10^{-8}$ F, and for a two-layer structure based on NaCl+polymer - from $0.125 \cdot 10^{-8}$ F to $3.9 \cdot 10^{-8}$ F. For a moisture sensitive element based on BaCl₂ – the range of capacitance change is from $0.060 \cdot 10^{-8}$ F to $3.9 \cdot 10^{-8}$ F, and for a two-layer structure based on BaCl₂+polymer - from $0.130 \cdot 10^{-8}$ F to $3.9 \cdot 10^{-8}$ F. On the basis of experimental studies it was found that the composition of complex compounds affects the sensitivity of the sensor, namely, the sensitive in the humidity range from 7 % to 27 % is a capacitive element, which is made on the basis of a hetero-metallic complex compound II, contains two antimony atoms. The sensitivity of such a capacitive element is 285 pF/‰. The capacitance versus relative humidity in the range from 30 % to 75 % is almost linear, and the sensitivity is 135 pF/‰. In the range of 75...95 %, there is a sharp increase in sensitivity up to 450 pF/‰ for all capacitive elements based on hetero-metallic complex compounds I – IV. On the basis of mathematical modeling, graphical dependences of the conversion function and sensitivity of the frequency parametric humidity

transducer are obtained. The highest sensitivity of the frequency parametric humidity transducer from changes in the ambient humidity is 62 ... 107 kHz/%.

Keywords: frequency transducer of humidity; humidity sensitive; capacitive element; negative differential resistance; transformation function; sensitivity equations.

Постановка проблеми

В останні роки вдосконалення технологій виробництва сенсорів фізичних величин відбувалося за рахунок швидкісних, малопотужних та недорогих мікроелектронних інтегральних схем подальшої обробки, сучасних методів отримання та обробки інформативних сигналів, а також досягнення технологій мікромініатюризації [1–2]. Послідовне підвищення якості та надійності первинних параметричних перетворювачів фізичних величин потрібне для комерційної конкурентоспроможності. На даний час методи моделювання та автоматизованого проектування успішно використовуються для прогнозування та покращення вихідних параметрів радіоелектронних схем первинних параметричних перетворювачів перед впровадженням у масове виробництво, даючи можливість заощадити час і підвищити якість [3]. Мікромініатюризація сенсорних пристроїв надає численні переваги, такі як низький гістерезис, пакетне оброблення, простота інтеграції в поєднанні із наступним зменшенням витрат. Широке застосування параметричних первинних сенсорів вологості знайшли як в інтелектуальних системах так і в різних галузях промислової індустрії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Використання первинних перетворювачів вологості в частотних пристроях, в яких вологість перетворюється у частоту, дозволяє значно підвищити чутливість, точність вимірювання вологості, спростити схеми подальшої обробки інформації [4–6]. В цьому випадку необхідно використовувати вологочутливий елемент у вигляді ємності, який є найоптимальнішим за сукупністю параметрів. Він забезпечує широкий діапазон вимірювань, високу надійність та низьку вартість при використанні мікроелектронної технології, яка дозволяє розробляти ємності планарного типу тонкоплівковим методом [7–8]. Завдяки цьому маємо мініатюрні габарити чутливого елемента, можливість розташування на кристалі спеціалізованої інтегральної схеми обробки сигналу [9–11]. Таким чином, для вимірювання вологості ємнісний метод є одним із найкращих.

Мета дослідження

Метою роботи є розроблення та дослідження математичної моделі автогенераторного параметричного перетворювача на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, яка враховує його ємнісні та індуктивні властивості. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі задачі: 1) провести аналіз та отримати аналітичний вираз для визначення залежності ємності вологочутливого елемента гребінцевої структури із захисним полімерним покриттям від відносної вологості навколишнього середовища; 2) отримати аналітичну залежність ємності вологочутливих елементів, виготовлених на основі комплексних сполук, від відносної вологості навколишнього середовища; 3) визначити залежність резонансної частоти параметричного перетворювача вологості від параметрів схеми, а також отримати аналітичну залежність частоти від зміни вологості, при якій в коливальній системі генератора повністю компенсуються втрати енергії за рахунок від'ємного диференційного опору; 4) зробити висновки по проведеному дослідженню.

Викладення основного матеріалу дослідження

Метою роботи є розробка нового параметричного перетворювача вологості з частотним виходом з вологочутливим ємнісним елементом. Схема генератора синусоїдальних коливань на основі складового транзистора приведена на рис. 1. Він складається з підсилювача потужності, резонатора, що визначає частоту генерації, і ланцюга зворотного зв'язку. Підсилювач утворений транзисторами VT1 і VT2. Вхідний опір складового транзистора в схемі із загальною базою має індуктивний характер і разом із ємністю C_1 утворить коливальний контур, що є резонатором. Для складового транзистора коефіцієнт підсилення по струму у визначеному частотному діапазоні має значення більше одиниці, що приводить до позитивного значення коефіцієнта зворотного зв'язку [4, 6]. Зворотний зв'язок по напрузі виявляється в складовому транзисторі сильніше, ніж в одиночному транзистора і це значною мірою полегшує самозбудження схеми.

Для експериментального дослідження схема параметричного перетворювача вологості (рис.1) була зібрана на транзисторній збірці BC847BDW1. Режим транзисторів VT1 і VT2 по постійному струму був таким: струм у ланцюзі емітера транзистора VT1 дорівнює 5,5 мА, а в ланцюзі емітера VT2 дорівнює 2,5 мА, напруга на колекторі – 5 В. Зовнішній базовий опір дорівнював 6 кОм. Цьому режиму відповідала частота генерації 760 кГц. При даній величині напруг живлення і опорів, схема генератора працювала в нормальному режимі, що відповідає синусоїдальній формі вихідної напруги. Описана схема генератора дозволяє одержати вихідну напругу до 15 В у широкому діапазоні частот. Нестабільність частоти дорівнює $2 \cdot 10^{-4}$ Гц.

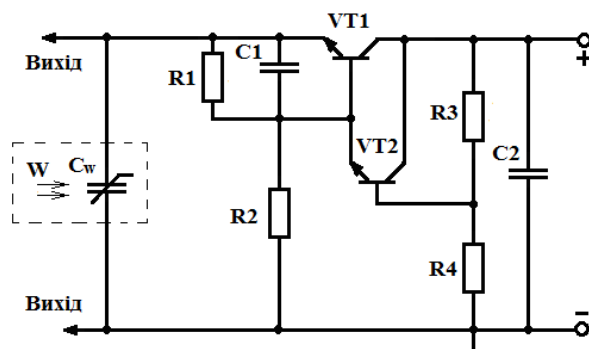


Рис. 1. Електрична схема перетворювача вологості з частотним виходом

Параметричний перетворювач вологості з частотним виходом розроблено на основі біполярної транзисторної структури (VT1, VT2), що утворює активну індуктивність з динамічним від'ємним опором, яка з вологочутливим конденсатором C_W утворює коливальний контур перетворювача. Конденсатор C_1 та резистор R_3 утворюють фазозсувне коло. За допомогою джерела постійної напруги схема вводиться в режим, коли на електродах емітер першого біполярного транзистора VT1 та база другого біполярного транзистора VT2 виникає динамічний від'ємний опір, який приводить до виникнення електричних коливань в контурі.

Резистори R_1 , R_2 , R_3 та R_4 забезпечують живлення схеми за постійним струмом, причому електричне живлення біполярної транзисторної структури (VT1, VT2) залежить від величини зміни ємності вологочутливого конденсатора C_W зі зміною вологості навколишнього середовища. Крім того, блокувальний конденсатор C_2 запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги. При дії вологи на вологочутливий конденсатор C_W змінюється ємнісна складова повного

опору на електродах емітер першого біполярного транзистора VT1 та база другого біполярного транзистора VT2, що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

В попередніх роботах авторами статті були проведені дослідження ємнісних вологочутливих елементів гребінцевої структури, створених на основі гігроскопічних солей $NaCl$ та $BaCl_2$ із захисним полімерним покриттям. Залежність ємності вологочутливого елемента від відносної вологості навколишнього середовища можна описати таким виразом:

$$C = \left(\begin{array}{l} \theta^a \lg \varepsilon_{\text{соли}} + \varepsilon_{\text{пол}} \left(1 + \frac{(1-\xi)}{1 - \frac{(1-\xi)}{3} + \frac{\varepsilon_{\text{пол}}}{\varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{\text{пол}}}} \right) + \varepsilon_{\Pi} + \\ + \delta k \left(\frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right) (1 - \theta^b) \lg \varepsilon_{H_2O} \end{array} \right) \varepsilon_0 l [2A_1(N-1) + A_2], \quad (1)$$

де $\theta = \frac{S_M \sigma_{\text{соли}}}{S_M \sigma_{\text{соли}} + \frac{G\chi}{\rho_{H_2O}}}$; $\xi = \frac{S_{\text{пол}} d_{\text{пол}}}{S_{\text{пол}} d_{\text{пол}} + V_{H_2O}}$;

$$A_1 = 3(d_{\Pi} / a)^{0,25} (b / d_{\Pi})^{0,44}; \quad A_2 = 0,77b / [(2N - 1)(a + b)] + 0,41.$$

S_M – площа меандру, мм^2 ; $\sigma_{\text{соли}}$ – товщина сольового покриття, мкм ; G – маса сухого повітря, г [12]; χ – величина, яка враховує зв'язок між масовим відношенням вологи і тиском пари [12]; ρ_{H_2O} – густина води, г/см^3 ; $\varepsilon_{\text{соли}}$ – діелектрична проникність солі; $\varepsilon_{\text{пол}}$ – діелектрична проникність поліметилметакрилату; $S_{\text{пол}}$ – площа поліметилметакрилату; $d_{\text{пол}}$ – товщина шару поліметилметакрилату; V_{H_2O} – об'єм води; ε_{H_2O} – діелектрична проникність води; ε_{Π} – діелектрична проникність підкладки; δ – відносна маса водяної пари по відношенню до сухого повітря при однакових тисках і температурах; $k = 1 \div 5$; $b = 0,5 \div 1$ при умові, що $a < b$; p_s – тиск насиченої пари при температурі T ; Па ; A – психрометрична стала, яка при $T_w = 20$ °C становить 0,00064; P – тиск повітря 101,325 кПа (760 мм рт.ст.); T – температура навколишнього середовища, °C; T_w – температура вологого термометра, °C; ε_0 – діелектрична стала вакууму, Ф/м ; l, a, b – величини, які враховують геометрію конденсатора, мм ; N – число секцій.

На основі аналітичного виразу (1) отримано графічні залежності ємності вологочутливого елемента від відносної вологості, які подано на рис. 2.

З графіків (див. рис. 2) видно, що в діапазоні відносної вологості від 30 % до 100 %, діапазон зміни ємності для вологочутливого елемента на основі $NaCl$ становить від $0,030 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф , а для двошарової структури на основі $NaCl$ +полімер – від $0,125 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф . Для вологочутливого елемента на основі $BaCl_2$ – діапазон

зміни ємності становить від $0,060 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф, а для двошарової структури на основі $BaCl_2$ +полімер – від $0,130 \cdot 10^{-8}$ Ф до $3,9 \cdot 10^{-8}$ Ф.

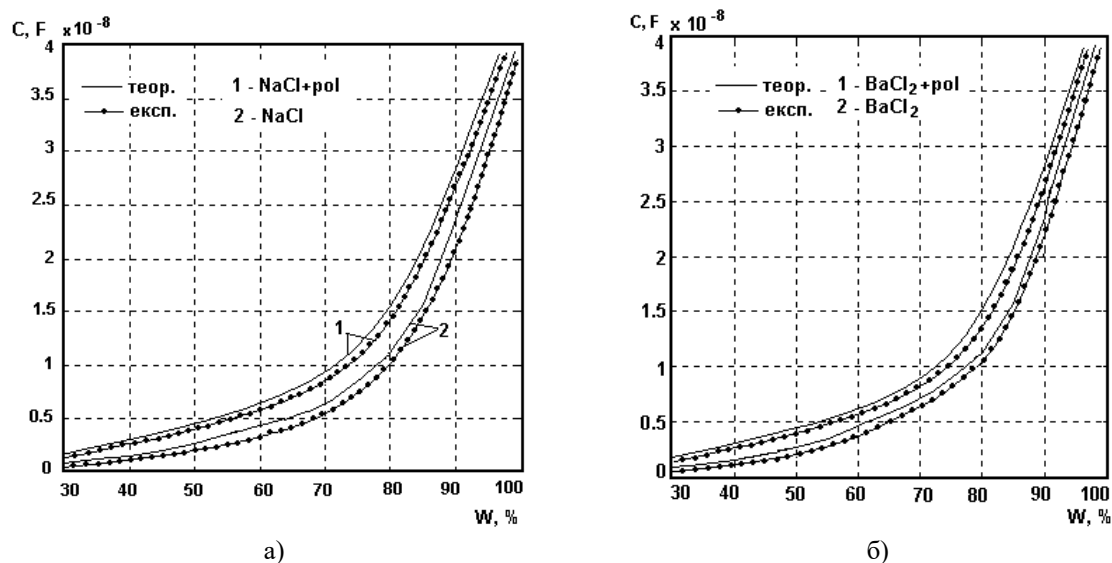


Рис. 2. Теоретичні та експериментальні залежності ємності вологочутливих елементів від зміни відносної вологості повітря, виготовлених: а – на основі $NaCl$ +полімер та $NaCl$; б – на основі $BaCl_2$ +полімер та $BaCl_2$.

Експериментальні дослідження показали, що створення захисного шару з метою запобігання випадіння точки роси зменшило діапазон зміни ємності [12]. Крім того, ці вологочутливі елементи працюють тільки в обмеженому діапазоні відносної вологості нижче точки роси. Тому для вирішення цієї проблеми, як вологочутливий шар ємнісного елемента, було використано гетерометалеві комплексні сполуки – стибій або бісмутвмісні діоксиди ніколу (II). Ці сполуки практично нерозчинні в спиртах, ацетоні, бензині, погано розчинні в диметилформаміді і диметилсульфоксиді. Однак є гігроскопічними і змінюють забарвлення із зміною відносної вологості навколишнього середовища [12].

Залежність ємності вологочутливих елементів, виготовлених на основі комплексних сполук, від відносної вологості навколишнього середовища можна описати таким виразом:

$$C = \left(\Omega^a \lg \varepsilon_{K.C.} + \varepsilon_{II} + 1 + \delta k \left(\frac{p_s - AP(T - T_w)}{P - (p_s - AP(T - T_w))} \right) \right) (1 - \Omega^b) \lg \varepsilon_{H_2O} \varepsilon_0 l [2A_1(N - 1) + A_2], \quad (2)$$

де
$$\Omega = \frac{S_M \sigma_{K.C.}}{S_M \sigma_{K.C.} + \frac{G \chi}{\rho_{H_2O}}};$$

$\sigma_{K.C.}$ – товщина нанесеного шару комплексної сполуки, мкм; $\varepsilon_{K.C.}$ – діелектрична проникність комплексної сполуки.

На основі аналітичного виразу (2) отримано графічні залежності ємності вологочутливого елемента, виготовлених на основі комплексних сполук, від відносної вологості, які подано на рис. 3.

На основі експериментальних досліджень встановлено, що на чутливість сенсора впливає склад комплексних сполук, а саме найчутливішим в діапазоні вологості від 7 % до 27 % є ємнісний елемент виготовлений на основі гетерометалевої комплексної сполуки II, яка містить два атома стибію. Чутливість такого ємнісного елемента набуває значення 285 пФ/%. Залежність ємності від відносної вологості, в діапазоні від 30 % до 75 %, практично лінійна, а чутливість дорівнює 135 пФ/%. В діапазоні 75...95 % спостерігається різке зростання чутливості аж до 450 пФ/% для всіх ємнісних елементів виготовлених на основі гетерометалевих комплексних сполук I – IV.

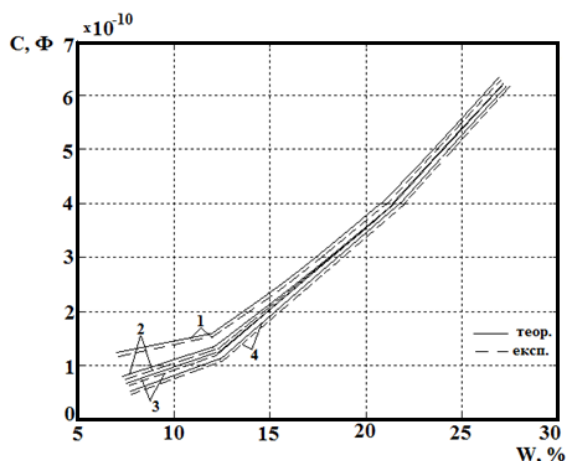


Рис. 3. Теоретичні та експериментальні залежності ємності від відносної вологості повітря в діапазоні 7...27% для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II.

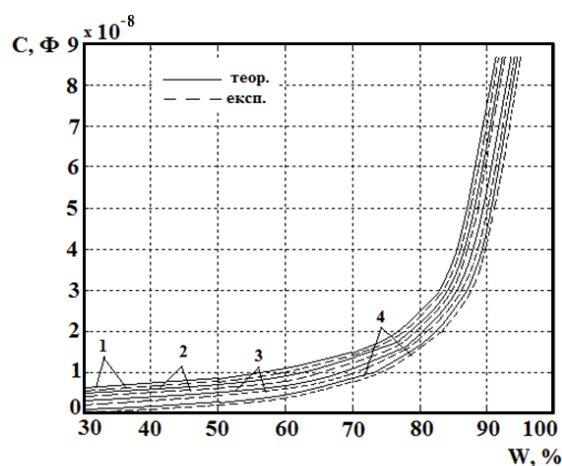


Рис. 4. Теоретичні та експериментальні залежності ємності від відносної вологості повітря в діапазоні 30...95% для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II.

На основі електричної схеми перетворювача вологості з частотним виходом (рис.1) з вологочутливим конденсатором, використовуючи метод Ляпунова [13], по колу позитивного зворотного зв'язку отримано рівняння, на основі якого визначено аналітичний вираз функції перетворення:

$$F = \frac{-6C_W(W) \pm 2\sqrt{9C_W^2(W) - 4R_{B2}^2C_{EB2}^2 - 4R_{B1}^2C_{EB1}^2}}{2\pi(4R_{B2}^2C_{EB2}^2 + 4R_{B1}^2C_{EB1}^2)}, \quad (3)$$

де $C_W(W)$ – ємність вологочутливого конденсатора; C_{EB1} , C_{EB2} – ємності $p-n$ переходів емітер-база біполярних транзисторів VT1 та VT2; R_{B1} , R_{B2} – опір бази біполярних транзисторів VT1 та VT2.

Чутливість параметричного перетворювача вологості з частотним виходом з вологочутливим ємнісним елементом визначається на підставі виразу (3) і описується рівнянням

$$S_W^F = \frac{-6\left(\frac{\partial}{\partial W} C_W(W)\right) \pm 18 \frac{C_W(W) \left(\frac{\partial}{\partial W} C_W(W)\right)}{\sqrt{9C_W^2(W) - 4R_{B2}^2C_{EB2}^2 - 4R_{B1}^2C_{EB1}^2}}}{2\pi(4R_{B2}^2C_{EB2}^2 + 4R_{B1}^2C_{EB1}^2)}. \quad (4)$$

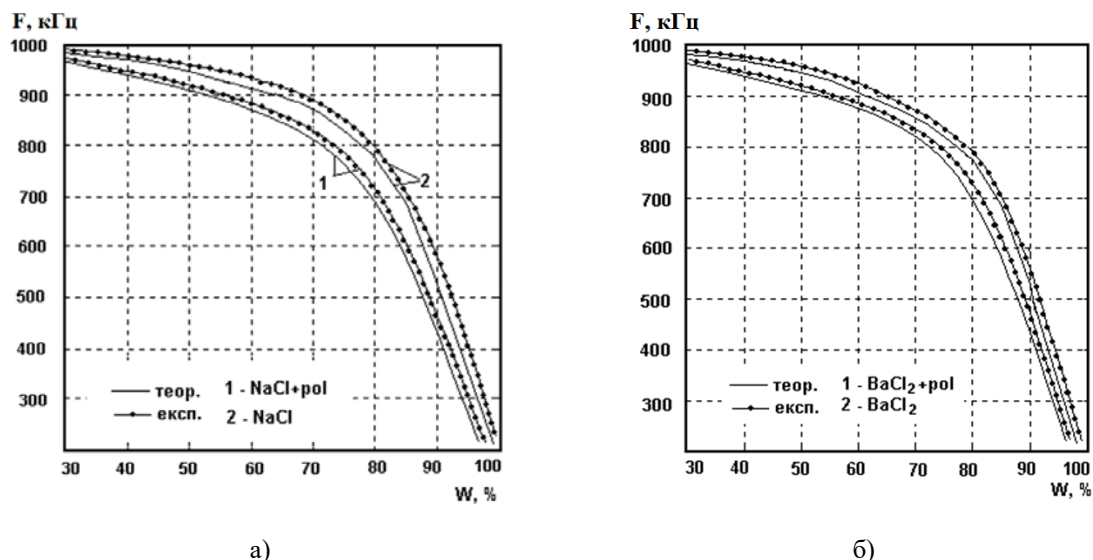


Рис. 5. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації перетворювача вологості з вологочутливими елементами, виготовлених: а – на основі NaCl+полімер та NaCl; б – на основі BaCl₂+полімер та BaCl₂

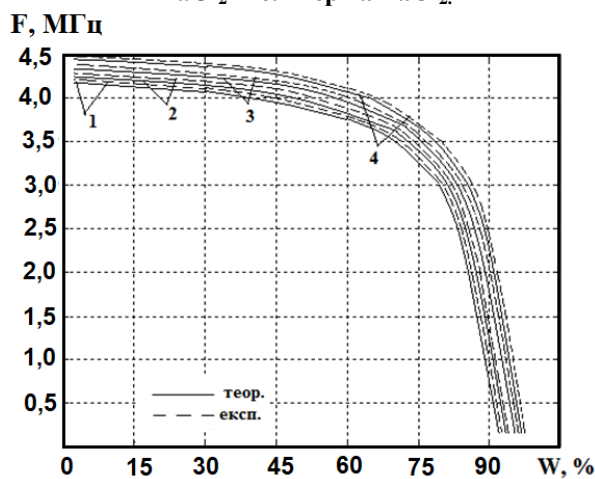


Рис. 6. Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації перетворювача вологості в діапазоні 7...95 % з ємнісними елементами виготовленими на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II.

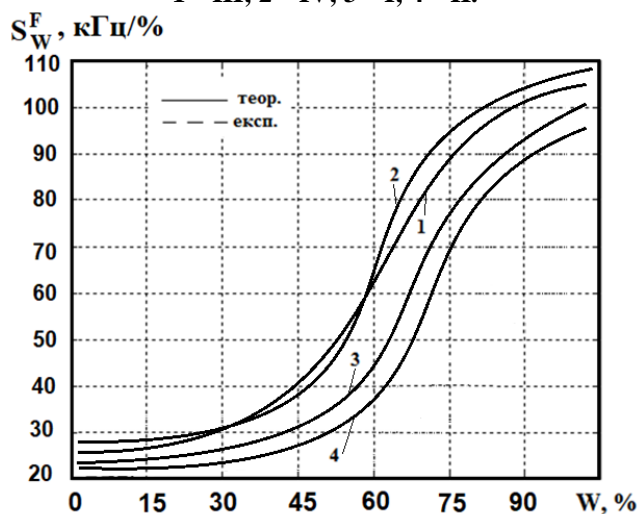


Рис. 7. Теоретичні залежності чутливості перетворювача вологості від відносної вологості повітря в діапазоні 7...95 % з ємнісними елементами виготовленими на основі комплексних сполук: 1 – III; 2 – IV; 3 – I; 4 – II

Графік залежності частоти генерації параметричного перетворювача вологості з частотним виходом від зміни вологості навколишнього середовища наведено на рис.5 та рис.6, а залежність чутливості параметричного перетворювача вологості з вологочутливим ємнісним елементом подано на рис. 7. Як видно з графіка, найбільша чутливість параметричного перетворювача вологості з частотним виходом для ємнісних елементів виготовлених на основі комплексних сполук (IV) та лежить у діапазоні від 60 до 95 % відносної вологості повітря і становить 62...107 кГц/%.

Висновки

Розроблено математичну модель частотного параметричного перетворювача вологості з ємнісними елементами виготовленими на основі: $NaCl$ +полімер, $NaCl$; $BaCl_2$ +полімер, $BaCl_2$, а також ємнісних елементів виготовленими на основі комплексних сполук. На основі математичного моделювання отримано графічні залежності функції перетворення та чутливості частотного параметричного перетворювача вологості. Найбільша чутливість частотного параметричного перетворювача вологості для зміни вологості навколишнього середовища становить 62...107 кГц/%.

Список використаної літератури

1. Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes. *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006. Vol. 114. № 1. P. 254–262.
2. Джексон Р. Г. Новейшие датчики. Москва: Техносфера, 2007. 384 с.
3. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012. 624 с.
4. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винница: «Универсум-Винница», 1999. 275 с.
5. Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Osadchuk I. A., Seletska O. O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of Photoreactive Effect in Bipolar and MOSFET Transistors. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. Vol. 11176. (Poland, Wilga, May 27 – June 2, 2019), pp. 11176I-1–11176I-12.
6. Osadchuk A. V., Osadchuk V. S., Osadchuk I. A., Kolimoldayev Maksat, Komada Paweł, Mussabekov Kanat. Optical Transducers with Frequency Output. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*. Vol. 10445. (Poland, Wilga, May 28 – June 6, 2017), pp. 10445-129–10445-132.
7. Farahani H., Wagiran R., Hamidon M. N. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2014. Vol. 14. Issue 5. P. 7881–7939.
8. Pelino M., Cantalini C. Principles and applications of ceramic humidity sensors. *Active and Passive Electronic Components*. 1994. Vol. 16. P. 69–87.
9. Tripathy Ashis, Pramanik Sumit, Manna Ayan, Bhuyan Satyanarayan, Shah Nabila Farhana Azrin, Radzi Zamri, Osman Noor Azuan Abu. Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca, Mg, Fe, Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption. *Sensors*. 2016. Vol. 16. Issue 7. P. 1135-1–135-18.
10. Lazarus Nathan, Bedair Sarah S., Lo Chiung-C., Fedder Gary K. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor. *Journal of Microelectromechanical System*. 2010. Vol. 19, № 1. P. 183 –191.
11. Zhi, Chen, Chi Lu. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. 2005. Vol. 3. № 4. P. 274 –295.

12. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Крилик Л. В. Сенсори вологості: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2003. 208 с.
13. Каяцкас А. А. Основы радиоэлектроники. Москва: Высшая школа, 1988. 464 с.

References

1. Bozhi, Yang, Burak, Aksak, Qiao, Lin, & Metin Sitti. (2006). Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes. *Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical*. **114**, 1, 254–262.
2. Dzhekson, R. G. (2007). *Novejshie datchiki*. Moskva: Tekhnosfera.
3. Sharapova, V. M., & Polishhuka, E. S. (Eds.) (2012). *Datchiki: Spravochnoe posobie*. Moskva: Tekhnosfera.
4. Osadchuk, V. S., & Osadchuk, O. V. (1999). *Reaktyvni vlastyvoli tranzystoriv i tranzystornykh skhem: monohrafiia*. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia».
5. Osadchuk, A. V., Osadchuk, V. S., Osadchuk, I. A., Seletska, O. O., Kisala, P., & Nurseitova, K. (2019). Theory of Photoreactive Effect in Bipolar and MOSFET Transistors. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*. Vol. 11176. (Poland, Wilga, May 27 – June 2, 2019), pp. 11176I-1–11176I-12.
6. Osadchuk, A. V., Osadchuk, V. S., Osadchuk, I. A., Kolimoldayev, Maksat, Komada, Paweł, & Mussabekov, Kanat. (2017). Optical Transducers with Frequency Output. *Proceedings of the Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*. Vol. 10445. (Poland, Wilga, May 28 – June 6, 2017), pp. 10445-129–10445-132.
7. Farahani, H., Wagiran, R., & Hamidon, M. N. (2014). Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*. **14**, 5, 7881–7939.
8. Pelino M., & Cantalini C. (1994). Principles and applications of ceramic humidity sensors. *Active and Passive Electronic Components*. 16, 69–87.
9. Tripathy, Ashis, Pramanik, Sumit, Manna, Ayan, Bhuyan, Satyanarayan, Shah, Nabila Farhana Azrin, Radzi, Zamri, & Osman, Noor Azuan Abu. (2016). Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca, Mg, Fe, Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption. *Sensors*. **16**, 7, 1135-1–135-18.
10. Lazarus, Nathan, Bedair, Sarah S., Lo, Chiung-C., & Fedder, Gary K. (2010). CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor. *Journal of Microelectromechanical System*. **19**, 1, 183 –191.
11. Zhi, Chen, & Chi Lu. (2005). Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. **3**, 4, 274 –295.
12. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V., & Krylyk L. V. (2003). *Sensory volohosti: monohrafiia*. Vinnytsia, «UNIVERSUM – Vinnytsia».
13. Kayatskas, A. A. (1988). *Osnovy radyoe lektroniki*. Moskva, Vysshaya shkola.

Осадчук Олександр Володимирович – д.т.н., професор, завідувач кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6662-9141.

Крилик Людмила Вікторівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Вінницького національного технічного університету, e-mail: lyudmila.krylik@gmail.com.

Осадчук Ярослав Олександрович – к.т.н., доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com.

УДК 656.135

Е.Е. ПРОЛИСКО, В.Н. ШУТЬ
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь
А.А. КОЗИНСКИЙ
Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина, Брест, Беларусь

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ В ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

Существующая система составления расписания для городского общественного транспорта (автобус, троллейбус, трамвай и т.д.) не является оптимальной. Не редки случаи, когда пассажиры в часы пик не могут попасть в транспортное средство из-за нехватки там места, а также случаи, когда транспортное средство на всем маршруте движения полупустое.

Предлагается метод оптимизации расписания движения городского общественного транспорта. Оптимальным будем считать такое расписание, при котором будут собраны все пассажиры на остановках с заданной вероятностью и максимальное количество пассажиров в каждом общественном транспортном средстве было бы близко (но не превышало) к емкости этого транспортного средства. Управляемым параметром при такой оптимизации, в данной работе, выбран момент отправки транспортного средства по маршруту.

Предполагается, что все остановки в населенном пункте снабжены регистраторами, с помощью которых пассажир, придя на остановку, должен указать конечный пункт своего движения. Все эти «заявки» автоматически регистрируются и используются для определения момента выезда транспортного средства. При этом необходимо учитывать, что за время движения этого транспортного средства по маршруту, на остановки могут приходиться дополнительные пассажиры, количество и конечные остановки которых, на момент отправки, не известны и могут быть представлены как случайные.

Данная оптимизация возможна если известны или могут быть оценены вероятностные характеристики пассажиропотоков. Известные распределения случайных величин, задающих количество пассажиров в транспортном средстве, позволяют оценить верхнюю границу этого количества с заданной вероятностью. В работе показано, что достаточно иметь оценки распределений количества пассажиров, приходящих на каждую остановку за заданное время, и вероятности того, что пришедший пассажир выберет одну из остановок по маршруту движения.

Математическая модель такой транспортной системы основана на предлагаемых методах оценки распределения всех других случайных величин, характеризующих проезд транспортного средства по маршруту (количество пассажиров в транспортном средстве и количество пассажиров, оставшихся на остановке).

Ключевые слова: транспорт, расписание движения, оптимизационная задача, план развозок, алгоритм.

Е.Е. ПРОЛІСКО, В.Н. ШУТЬ
Брестський державний технічний університет, Брест, Білорусь
А.А. КОЗИНСЬКИЙ
Брестський державний університет ім. А.С. Пушкіна, Брест, Білорусь

УПРАВЛІННЯ ПЕРЕВІЗНИМ ПРОЦЕСОМ В МІСЬКІЙ ПАСАЖИРСЬКІЙ ТРАНСПОРТНІЙ СИСТЕМІ

Існуюча система складання розкладу для міського громадського транспорту (автобус, тролейбус, трамвай і т.д.) не є оптимальною. Не рідкісні випадки, коли пасажир в години пік не можуть потрапити в транспортний засіб через брак там місця, а також випадки, коли транспортний засіб на всьому маршруті руху напівпорожнє.

Пропонується метод оптимізації розкладу руху міського громадського транспорту. Оптимальним будемо вважати такий розклад, при якому будуть зібрані всі пасажир на зупинках із заданою вірогідністю і максимальна кількість пасажирів в кожному громадському транспортному засобі було б близько (але не перевищувало) до ємності цього транспортного засобу. Керованим параметром при такій оптимізації, в даній роботі, обраний момент відправки транспортного засобу за маршрутом.

Передбачається, що всі зупинки в населеному пункті забезпечені реєстраторами, за допомогою яких пасажир, прийшовши на зупинку, повинен вказати кінцевий пункт свого руху. Всі ці «заявки» автоматично реєструються і використовуються для визначення моменту виїзду транспортного засобу. При цьому необхідно враховувати, що за час руху цього транспортного засобу за маршрутом, на зупинки можуть приходити додаткові пасажир, кількість і кінцеві зупинки яких, на момент відправки, не відомі і можуть бути представлені як випадкові.

Дана оптимізація можлива якщо відомі або можуть бути оцінені ймовірні характеристики пасажиропотоків. Відомі розподілу випадкових величин, які задають кількість пасажирів в транспортному засобі, дозволяють оцінити верхню межу цієї кількості із заданою вірогідністю. В роботі показано, що достатньо мати оцінки розподілів кількості пасажирів, що приходять на кожну зупинку за заданий час, і ймовірності того, що прийшов пасажир вибере одну із зупинок по маршруту руху.

Математична модель такої транспортної системи заснована на пропозованих методах оцінки розподілу всіх інших випадкових величин, що характеризують проїзд транспортного засобу за маршрутом (кількість пасажирів в транспортному засобі і кількість пасажирів, що залишилися на зупинці).

Ключові слова: транспорт, розклад руху, оптимізаційна задача, план розвозок, алгоритм.

E.E. PROLISKO, V.N. SHUTS
Brest state technical University, Brest, Belarus
A.A. KOZINSKY
Brest State University A.S. Pushkin, Brest, Belarus

MANAGING THE TRANSPORTATION PROCESS IN THE CITY PASSENGER TRANSPORT SYSTEM

The current scheduling system for urban public transport (bus, trolleybus, tram, etc.) is not optimal. It is not uncommon for passengers to get into a vehicle during rush hours due to lack of space, as well as cases when the vehicle is half empty along the entire route.

A method for optimizing the timetable for urban public transport is proposed. We will consider the optimal schedule when all passengers at stops will be collected with a given probability and the maximum number of passengers in each public transport vehicle would be close (but not exceed) to the capacity of this vehicle. The controlled parameter with such optimization, in this work, is the moment of sending the vehicle along the route.

It is assumed that all stops in the settlement are equipped with registrars, with the help of which the passenger, upon arriving at the stop, must indicate the destination of his movement. All these “requests” are automatically registered and used to determine when the vehicle leaves. It should be borne in mind that during the movement of this vehicle along the

route, additional passengers may come to stops, the number and final stops of which, at the time of departure, are not known and can be presented as random.

This optimization is possible if the probabilistic characteristics of passenger traffic are known or can be estimated. The known distributions of random variables specifying the number of passengers in a vehicle allow us to estimate the upper bound of this number with a given probability. It is shown in the paper that it is sufficient to have estimates of the distributions of the number of passengers arriving at each stop in a given time, and the probability that the arriving passenger will choose one of the stops along the route.

The mathematical model of such a transport system is based on the proposed methods for assessing the distribution of all other random variables characterizing the passage of a vehicle along a route (the number of passengers in the vehicle and the number of passengers remaining at the stop).

Keywords: transport, traffic schedule, optimization problem, delivery plan, algorithm.

Постановка проблемы

Наблюдаемый в последнее время количественный рост личного транспорта в мегаполисах опережает рост дорожной инфраструктуры. Это ведет к возникновению дорожных заторов, загрязнению воздуха выхлопными газами и т.п. Возможным решением данной проблемы является оптимальное использование общественного транспорта.

Применяемая в настоящее время система составления расписания движения транспортного средства (ТС) по перевозке пассажиров не оптимальная. Оптимальной считаем такую поездку, при которой будут «собраны» все пассажиры со всех остановок с заданной вероятностью α , т.е., с вероятностью $(1 - \alpha)$ хотя бы одному пассажиру на всем маршруте не хватит места.

Цель исследований

Целью работы системы является определение момента времени выезда ТС на маршрут, при котором будет решена поставленная задача оптимизации. Основная проблема состоит в необходимости учета пассажиров, которые могут подойти на остановки после выезда ТС на маршрут.

Изложение основного материала исследования

Пусть по маршруту движения ТС расположены k остановок (рис. 1), каждая из которых снабжена системой фиксации появления пассажира и приема от него указания на конечный пункт своей поездки [1–2].

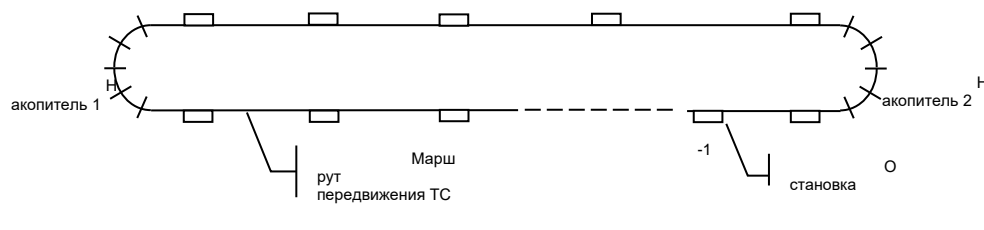


Рис. 1. Схема маршрута общественного транспорта.

Время переезда от $(i - 1)$ -й до i -й остановки обозначим как Δt_i , $i = 1, \dots, k$. При этом Δt_1 это либо время доезда до первой остановки, если ТС отправляется из некоторого накопителя, либо $\Delta t_1 \equiv 0$ если ТС дожидается выезда на первой остановке.

Остановки оборудованы пультами, на которых каждый из пассажиров указывает конечную остановку своей поездки. Данные со всех остановок поступают на

управляющий компьютер. На этом компьютере для каждого маршрута создаем два одномерных целочисленных массива (вектора) «вектор-откуда» – $V^{(o)}$ и «вектор-куда» – $V^{(k)}$. Эти векторы имеют индексы от 1 до k . В момент, когда пассажир на i -й остановке указывает на пульте свою цель – j -ю остановку, компьютер добавляет по 1 в i -ю ячейку вектора $V^{(o)}$ и в j -ю ячейку вектора $V^{(k)}$. Эти данные собираются до выезда ТС и составляют «известную» информацию. На момент выезда ТС количество «известных» пассажиров в ТС на i -й остановке составит

$$n_i = \sum_{j=1}^i (V_j^{(o)} - V_j^{(k)}), \quad i = 1, \dots, k. \quad (1)$$

За время движения ТС по маршруту на остановки могут еще подходить пассажиры, моменты прихода и конечные остановки которых, на момент начала движения ТС, не известны. Количество этих «неизвестных» пассажиров можно представить как *дискретную случайную величину* (ДСВ). Но, при этом, считаем известными распределение этих ДСВ за заданный интервал времени для каждой остановки. Т.е. для интервала $[t_1, t_2]$ величина $p_{i,j}(t_1, t_2)$ равна вероятности того, что на i -ой остановке за этот интервал подойдет ровно j пассажиров ($i = 1, \dots, k - 1, j = 0, 1, 2, \dots$). Если понятно о каком временном интервале идет речь, то его можно опустить и писать просто $p_{i,j}$. Например, если поток пассажиров на i -ой остановке является пуассоновским с известной интенсивностью $\lambda_i(t)$, то все вероятностные характеристики определяются через интегральный параметр $\Lambda_i(t_1, t_2)$ [3]

$$\Lambda_i(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \lambda_i(t) dt. \quad (2)$$

Тогда вероятность появления за этот интервал на данной остановке ровно j пассажиров определяется как

$$p_{i,j}(t_1, t_2) = \frac{\Lambda_i^j(t_1, t_2)}{j!} \exp(-\Lambda_i(t_1, t_2)), \quad i = 1, \dots, k, \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

Обычно используют рекуррентное соотношение:

$$p_{i,0}(t_1, t_2) = \exp(-\Lambda_i(t_1, t_2)), \quad p_{i,j}(t_1, t_2) = p_{i,j-1}(t_1, t_2) \cdot \Lambda_i(t_1, t_2) / j. \quad (3)$$

Известной считаем также матрицу $Q = [q_{ij}]$, где q_{ij} , $i, j = 1, \dots, k$, – вероятность того, что пассажир, севший на i -й остановке, едет до j -й.

Математическая модель

Для обеспечения работы математической модели необходимо уметь:

- находить распределение суммы двух ДСВ;
- оценивать изменение распределения ДСВ при условии, что каждый элемент выбывает из множества (пассажир выходит на остановке) с заданной вероятностью;
- оценивать распределение оставшихся на остановке пассажиров, которым не хватило места в ТС.

При известных распределениях двух ДСВ X и Y распределение их суммы описывается известной операцией свертки, которая в нашем случае примет вид

$$p_i^{(\Sigma)} = \sum_{j=\max(0, i-MY)}^{\min(i, MX)} p_j^{(X)} \cdot p_{i-j}^{(Y)}, \quad i = 0, \dots, MX + MY, \quad (4)$$

где MX и MY – соответственно максимальные индексы для ДСВ X и Y .

Распределение ДСВ p_i , $i = 0, \dots, M$, после случайного прореживания с вероятностью q можно описать как [4–5]

$$p'_i = p_i - \sum_{r=1}^i C_i^{i-r} \cdot p_i \cdot q^r \cdot (1-q)^{i-r} + \sum_{r=i+1}^M C_r^{r-i} \cdot p_r \cdot q^{r-i} \cdot (1-q)^i, \quad i = 0, \dots, M, \quad (5)$$

где M – максимальный индекс в исходном распределении; C_i^j – количество сочетаний из i элементов по j ; p_i – исходная вероятность.

Можно использовать рекуррентные соотношения. Для первой суммы

$$a_1 = C_i^{i-1} \cdot p_i \cdot q^i \cdot (1-q)^{i-1} = i \cdot p_i \cdot q^i \cdot (1-q)^{i-1},$$

$$a_r = a_{r-1} \cdot q \cdot (i-r+1) / (r \cdot (1-q)), \quad r = 2, \dots, i.$$

Для второй суммы, соответственно

$$b_{i+1} = C_{i+1}^{i+1-i} \cdot p_{i+1} \cdot q^{i+1-i} \cdot (1-q)^i = (i+1) \cdot p_{i+1} \cdot q \cdot (1-q)^i,$$

$$b_r = b_{r-1} \cdot r \cdot p_r \cdot q / ((r-1) \cdot p_{r-1}), \quad r = i+2, \dots, M.$$

Надо учитывать, что условная вероятность потери элемента, при продвижении ТС по маршруту, изменяется. Так для пассажиров, садящихся на i -ой остановке $q'_{i,i+1} = q_{i,i+1}$, а для всех последующих остановок

$$q'_{i,j} = \frac{q_{i,j}}{\sum_{m=j}^k q_{i,m}}, \quad j = i+2, \dots, k. \quad (6)$$

После проезда i -й остановки распределение количества «неизвестных» пассажиров, оставшихся в ТС запишется как

$$p_j^{(TC)} = p_{i,j}, \quad j = 0, \dots, N - n_i - 1, \quad p_{N-n_i}^{(TC)} = \sum_{r=N-n_i}^M p_{i,r}, \quad (7)$$

а распределение оставшихся на остановке пассажиров примет вид

$$p_0^{(ocm)} = \sum_{r=0}^{N-n_i} p_{i,r}, \quad p_j^{(ocm)} = p_{i,j+N-n_i}, \quad j = 1, \dots, M - (N - n_i), \quad (8)$$

где N – количество мест в ТС; n_i – количество «известных» пассажиров в ТС определяемое по формуле (1); M – максимальное количество пассажиров на остановке.

Для «неизвестных» пассажиров, поступающих в ТС на i -й остановке, введем функцию распределения $F_{i,j}$

$$F_{i,j} = \sum_{r=0}^j p_{i,r}, \quad i = 1, \dots, k-1, \quad j = 0, 1, 2, \dots, \quad (9)$$

которая задает вероятность того, что в ТС на i -ой остановке попытаются попасть не более чем j «неизвестных» пассажиров. Тогда величину P , задающую вероятность того, что ТС при проходе по маршруту соберет всех пассажиров, определим, как

$$P = \prod_{i=1}^{k-1} F_{i, N-n_i}. \quad (10)$$

Алгоритм оценки пассажиром времени ожидания транспортного средства

Алгоритм оценки времени ожидания ТС состоит из 10 шагов:

- шаг 1. вначале ТС – пустое. Распределение количества пассажиров имеет единственное, нулевое, значение с вероятностью 1. Текущее время системы $t = 0$ и «известных» пассажиров на остановках нет. Очередная остановка – первая. Переход к шагу 2;
- шаг 2. получаем распределение количества пассажиров на очередной остановке за время доезда. Если полагаем возможным использования пуассоновской модели, то можно воспользоваться формулами (2) и (3). Переход к шагу 3;
- шаг 3. если данное ТС не первое, то суммируем ДСВ количества пришедших пассажиров и ДСВ пассажиров, оставшихся после предыдущего ТС по формуле (4). Переход к шагу 4;
- шаг 4. оцениваем распределение количества пассажиров в ТС для очередной остановки: производим прореживание распределения по формуле (5) с учетом (6). Переход к шагу 5;
- шаг 5. находим сумму ДСВ количества пассажиров в ТС и на остановке по формуле (4) и вычисляем функцию распределения по формуле (9). Переход к шагу 6;
- шаг 6. преобразуем распределение количества пассажиров в ТС по формуле (7) и определяем распределение оставшихся на остановке пассажиров по формуле (8). Переход к шагу 7;
- шаг 7. если очередная остановка не предпоследняя, то номер очередной остановки увеличиваем на 1 и переход к шагу 2, иначе переход к шагу 8;
- шаг 8. получаем величину P по формуле (10). Переход к шагу 9;
- шаг 9. если $P \leq \alpha$, то текущее время t считаем моментом выезда ТС по маршруту. Конец. Иначе переход к шагу 10;
- шаг 10. система ожидает приход очередного пассажира. Текущее время t считаем равным этому моменту. Изменяем состояния векторов $V^{(o)}$ и $V^{(κ)}$ и получаем оценки количества «известных» пассажиров по формуле (1). Переход к шагу 2.

Выводы

Все теоретические выкладки были проверены с использованием аппарата имитационного моделирования. Цель работы (определение момента времени выезда ТС на маршрут) достигнута. При этом решена поставленная задача оптимизации и учтены все пассажиры, которые могут подойти на остановки после выезда ТС на маршрут.

Список использованной литературы

1. Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Адаптивная модель транспортной системы «ИНФОБУС». *Актульні проблеми фундаментальних наук (АПФН'2017)*», присвячено пам'яті Нормана Роберта Кемпбелла та Еррола Е. Гарріса: Матеріали II міжнародної наукової конференції. (м. Луцьк, 30 травня-5 червня 2017 р.). Луцьк: Вежа-Друк, 2017. С. 202–205.
2. Капский Д. В., Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Система городского общественного транспорта будущего. *Международная юбилейная научно-техническая конференция «Автомобильные дороги безопасность и надежность» посвященная 90-летию Белорусской дорожной науки: Сборник докладов. Часть 1.* (г. Минск, 22-23 ноября 2018 г.). Минск, 2018. С. 194–202.
3. Большаков И. А., Ракошиц В. С. Прикладная теория случайных потоков. М: Советское радио, 1978. 248 с.
4. Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Возможности и перспективы беспилотного городского общественного транспорта. *Математические методы в технике и технологиях: сборник трудов Международной научной конференции. Т. 9.* (Санкт-Петербург, 10–14 сентября 2018 г.). С-Пб.: издательство Политехнического университета, 2018. С. 16–23.
5. Shuts V., Kasyanik V. Mobile Autonomous Robots – a New Type of City Public Transport. *Transport and Telecommunication*. 2011. Vol. 12. № 4. P. 52–60.

References

1. Prolisko, E. E., & Shuts, V. N. (2017) Adaptivnaya model transportnoy sistemy «INFOBUS». Proceedings of the *Aktulny problemy fundamentalnykh nauk (APFN2017): Materialy II mizhnardnoi naukovoї konferentsii* (Lutsk, May 30–June 5, 2017), Lutsk: Vezha-Druk, pp. 202–205.
2. Kapskiy, D. V., Prolisko, E. E., & Shuts, V. N. (2018). Sistema gorodskogo obschestvennogo transporta buduschego. Proceedings of the *Avtomobilnyie dorogi bezopasnost i nadezhnost, posvyaschennaya 90-letiyu Belorusskoy dorozhnoy nauki. Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy yubileynoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Part 1.* (Minsk, November 22-23, 2018), pp. 194–202.
3. Bolshakov, I. A., & Rakoshchits, V. S. (1978). *Prikladnaya teoriya sluchaynykh potokov*. M : Sovetskoe radio.
4. Prolisko, E. E., & Shuts, V. N. (2018). *Vozmozhnosti i perspektivyi bespilotnogo gorodskogo obschestvennogo transporta*. Proceedings of the *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologiyah : Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Vol. 9. (St. Petersburg, September 10-14, 2018). S-Pb.: izdatelstvo Politehnicheskogo universiteta, pp. 16–23.
5. Shuts, V., & Kasyanik, V. (2011). Mobile Autonomous Robots – a New Type of City Public Transport. *Transport and Telecommunication*. **12**, 4, 52–60.

Пролиско Евгений Евгеньевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета, Беларусь. e-mail: proliisko55@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5426-7400.

Шуть Василий Николаевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета, Беларусь. e-mail: lucking@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7979-6157.

Козинский Андрей Андреевич – к.п.н., доцент, доцент кафедры прикладной математики и информатики Брестского государственного университета им. А.С. Пушкина, Беларусь. e-mail: kaa1964@bk.ru, ORCID: 0000-0002-2949-4724.

УДК 532.516

Д.А. РЕДЧИЦ, С.В. ТАРАСОВ, А.С. ТАРАСОВ
Институт транспортных систем и технологий НАН Украины
С.В. МОЙСЕЕНКО
Херсонский национальный технический университет

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ

Разработана новая математическая модель низкотемпературной неравновесной идеальной плазмы диэлектрического барьерного разряда в воздухе. В качестве базового выбран диффузионно-дрейфовый подход для описания пространственно-временной структуры, включая нестационарные электродинамические процессы, кинетические явления и плазмохимические реакции. В модели учитываются электронно-возбуждённые и метастабильные состояния молекул азота и кислорода, атомы кислорода, электроны, а также положительные и отрицательные ионы, в общей сложности 14 частиц и 97 плазмохимических реакций, включая поверхностные процессы. Химические реакции включают процессы диссоциации, ионизации молекул электронным ударом из основного состояния, ступенчатую и ассоциативную ионизацию, фотоионизацию, возбуждение молекул, ионизацию возбужденных (метастабильных) молекул, прилипание и отлипание электронов, рекомбинацию электронов и положительных ионов, химические превращения нейтральных атомов, молекул и ионов, а также процессы вторичной эмиссии электронов из открытого электрода и диэлектрической поверхности. Для нестационарных уравнений динамики плазмы разработан неявный численный алгоритм с подитерациями по псевдовремени, который базируется на конечно-объемном подходе. В нестационарных уравнениях для плотности частиц плазмы аппроксимация дрейфовых производных осуществляется с помощью схемы TVD с функцией-ограничителем MinMod. Реализован единый неявный численный алгоритм для эффективного решения неоднородной системы исходных уравнений. Проведена серия вычислительных экспериментов по моделированию нестационарных процессов низкотемпературной неравновесной плазмы диэлектрического барьерного разряда. Проведено детальное изучение стадий зарождения, развития и гашения катодонаправленного стримера для реальных конфигураций плазменных актуаторов на основе разработанной математической модели. Проанализированы нестационарные характеристики плазмы в области над диэлектрической поверхностью, включая распределение плотности частиц, электрического потенциала и компонент силы Лоренца.

Ключевые слова: диэлектрический барьерный разряд; плазменный актуатор; динамика плазмы.

Д.О. РЕДЧИЦЬ, С.В. ТАРАСОВ, А.С. ТАРАСОВ
Інститут транспортних систем і технологій НАН України
С.В. МОЙСЕЄНКО
Херсонський національний технічний університет

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПОТОКІВ ХОЛОДНОЇ ПЛАЗМИ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ

Розроблено нову математичну модель низькотемпературної нерівноважної ідеальної плазми діелектричного бар'єрного розряду в повітрі. За базовий обраний

дифузійно-дрейфовий підхід для опису просторово-часової структури, включаючи нестационарні електродинамічні процеси, кінетичні явища та плазмохімічні реакції. У моделі враховуються електронно-збуджені та метастабільні стани молекул азоту та кисню, нейтральні атоми кисню, електрони, а також позитивні та негативні іони, у цілому 14 частинок і 97 плазмохімічних реакцій, включаючи поверхневі процеси. Хімічні реакції включають: процеси дисоціації, іонізації молекул електронним ударом з основного стану; ступінчасту й асоціативну іонізацію, фотоіонізацію; збудження молекул; іонізацію збуджених (метастабільних) молекул; прилипання і відлипання електронів; рекомбінацію електронів і позитивних іонів; хімічні перетворення нейтральних атомів, молекул та іонів, а також процеси вторинної емісії електронів з відкритого електрода і діелектричної поверхні. Для нестационарних рівнянь динаміки плазми розроблено неявний чисельний алгоритм з підітераціями за псевдочасом, який базується на скінченно-об'ємному підході. У нестационарних рівняннях для густини частинок плазми апроксимація дрейфових похідних здійснюється за допомогою схеми TVD з функцією-обмежувачем MinMod. Реалізовано єдиний неявний чисельний алгоритм для ефективного розв'язання неоднорідної системи вихідних рівнянь. Проведено серію обчислювальних експериментів з моделювання нестационарних процесів низькотемпературної нерівноважної плазми діелектричного бар'єрного розряду. Проведено детальне вивчення стадій зародження, розвитку і гасіння катодоспрямованого струмера для реальних конфігурацій плазмових актуаторів на основі розробленої математичної моделі. Проаналізовано нестационарні характеристики плазми в області над діелектричною поверхнею, включаючи розподіл густини частинок, електричного потенціалу і компонент сили Лоренца.

Ключові слова: діелектричний бар'єрний розряд, плазмовий актуатор, динаміка плазми

D.O. REDCHYTS, S.V. TARASOV, A.S. TARASOV
 Institute of Transport Systems and Technologies of Ukrainian National Academy of Science
 S.V. MOISEENKO
 Kherson National Technical University

NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY COLD PLASMA STREAMS OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN AIR

A new mathematical model of a low-temperature non-equilibrium ideal plasma of a dielectric barrier discharge in air is developed. The drift-diffusion approach is chosen as the base for describing the spatial-temporal structure, including unsteady electrodynamic processes, kinetic phenomena, and plasma-chemical reactions. The model takes into account electronically excited and metastable states of nitrogen and oxygen molecules, oxygen atoms, electrons, as well as positive and negative ions, a total of 14 particles and 97 plasma-chemical reactions, including surface processes. Chemical reactions include the processes of dissociation, ionization of molecules by electron impact from the ground state, stepwise and associative ionization, photoionization, excitation of molecules, ionization of excited (metastable) molecules, electron attachment and detachment, recombination of electrons and positive ions, chemical transformations of neutral atoms, molecules and ions, as well as processes of secondary electron emission from an open electrode and a dielectric surface. For unsteady equations of plasma dynamics, an implicit numerical algorithm with pseudo-time iteration is developed, which is based on a finite-volume approach. In unsteady equations for the density of plasma particles, the drift derivatives were approximated using the TVD scheme with the MinMod limit function. A single implicit numerical algorithm for the efficient solution of a nonuniform system of initial equations is implemented. A series of

computational experiments are conducted to simulate the unsteady processes of a low-temperature nonequilibrium plasma of a dielectric barrier discharge. A detailed study of the stages of formation, development, and quenching of a cathode-directed streamer for real configurations of plasma actuators based on the developed mathematical model has been carried out. The unsteady plasma characteristics in the region above the dielectric surface are analyzed, including the distribution of particle density, electric potential, and components of the Lorentz force.

Keywords: dielectric barrier discharge, plasma actuator, plasma dynamics

Постановка проблемы

Применение плазменных актуаторов (ПА) на основе диэлектрического барьерного разряда (ДБР) относится к числу современных и перспективных способов изменения структуры течения воздуха [1–3]. Совершенствование существующих конструкций плазменных актуаторов и их работы на основе диэлектрического барьерного разряда требует полного анализа всей совокупности протекающих физико-химических процессов, включая как макроскопические характеристики ДБР, так и структуру отдельного микроарзряда, а также состав продуктов плазмохимических реакций.

Существующие математические модели динамики частично ионизированного потока опираются на эмпирические константы и пригодны только для отдельных классов течений. Разработка модели для описания процессов, исследуемых в широком диапазоне определяющих параметров, является актуальной и пока нерешенной задачей в данной области знаний.

Как показывает практика, для создания математической модели недостаточно просто выписать дифференциальные уравнения, описывающие конкретные физические процессы. Единая система, описывающая разнородные физико-химические процессы, сталкивается с проблемой рассогласования по характерным временам и скоростям, разнородностью протекания физических процессов (диффузия, адвекция, кросс-слагаемые в источниковых членах) и их математическим описанием.

Одной из главных проблем является различие масштабов по времени протекания нелинейных физических процессов. Так слишком мелкий шаг интегрирования снижает общую эффективность численного алгоритма на 2-3 порядка. Процессы, приводящие к мелким шагам по времени (например, зарождение стримера), зачастую бывают локальными, т.е. происходят в сравнительно небольшой период цикла. Использование традиционных численных методов связано с чрезвычайно большими и зачастую нерациональными затратами процессорного времени, что в свою очередь, ведет к невозможности проведения вычислительного эксперимента.

Анализ последних исследований и публикаций

Исходя из результатов предыдущих исследований по методам математического описания низкотемпературной неравновесной идеальной плазмы [6–8], в качестве базового выбран диффузионно-дрейфовый подход для описания пространственно-временной структуры диэлектрического барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении, включая кинетические явления и плазмохимические реакции.

Цель исследования

Цель работы – построение математической модели для описания параметров нестационарных потоков низкотемпературной плазмы диэлектрического барьерного разряда в воздухе.

Изложение основного материала исследования

В качестве рабочего газа выступает воздух с фиксированной долей азота $N_2/N_{air} = 0,78$ и кислорода $O_2/N_{air} = 0,22$ при нормальном давлении на уровне моря $p = 101325 \text{ Н/м}^2$ (1 атм.). Температура воздуха принимается постоянной и равной $T = 300 \text{ К}$. Общее число молекул азота и кислорода в единице объема составляет $N_{air} = 2,447 \cdot 10^{25} \text{ 1/м}^3$. В работе рассматриваются электронно-возбужденные и метастабильные (*) состояния молекул азота $N_2^*(A^3\Sigma_u^+)$, $N_2(B^3\Pi_g)$, $N_2(a'^1\Sigma_u^-)$, $N_2(C^3\Pi_u)$ и кислорода $O_2^*(a^1\Delta_g)$, $O_2^*(b^1\Sigma_g^+)$, атомы кислорода O , электроны e , а также положительные N_2^+ , N_4^+ , O_2^+ , O_4^+ и отрицательные ионы O^- , O_2^- , в общей сложности 14 частиц и 97 плазмохимических реакций, включая поверхностные процессы.

Химические реакции включают процессы диссоциации, ионизации молекул электронным ударом из основного состояния, ступенчатую и ассоциативную ионизацию, фотоионизацию, возбуждение молекул, ионизацию возбужденных (метастабильных) молекул, прилипание и отлипание электронов, рекомбинацию электронов и положительных ионов, химические превращения нейтральных атомов, молекул и ионов, а также процессы вторичной эмиссии электронов из открытого электрода и диэлектрической поверхности. Так как плазма диэлектрического барьерного разряда является неравновесной, то температура ионов равна температуре воздуха. Температура, подвижность и диффузия электронов, а также коэффициенты некоторых химических реакций (ионизации, возбуждения, прилипания) зависят от напряженности электрического поля и рассчитываются с помощью солвера BOLSIG+ [5], который основан на решении уравнения Больцмана с использованием функции распределения электронов по скоростям и энергиям.

С целью верификации разработанной численно-аналитической математической модели проведены тестовые расчеты диэлектрического барьерного разряда при работе плазменного актуатора в неподвижном воздухе при атмосферном давлении.

Исходные данные соответствуют экспериментальным работам [9–10]. Диэлектрик представляет собой керамический материал Масог с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 6$ и толщиной $d = 2,1 \text{ мм}$. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_r = 1,0006$. Electroды представляют собой полоски меди. Длина открытого электрода составляет 5 мм, а изолированного – 25 мм. К верхнему электроду прикладывалось напряжение амплитудой $\phi^{\max} = 7 \text{ кВ}$ [9] и $\phi^{\max} = 12 \text{ кВ}$ [10], частотой 5 кГц и 200 Гц, соответственно. Рассматривается четверть периода колебания приложенного напряжения для демонстрации возможностей разработанной новой математической модели.

В эксперименте диэлектрическая поверхность состоит из мелких сегментов, что дает возможность измерить распределение напряжения по поверхности диэлектрика.

Для адекватного описания зарождения, развития и прохождения стримера используется переменный шаг интегрирования по времени ($\Delta t = 10^{-7} \div 10^{-12} \text{ с}$). Начало координат совпадает с правым краем открытого электрода. Многоблочная сетка, описывающая геометрию расчетной области вблизи плазменного актуатора, состоит из 5 блоков: один для воздушной области ($1 \cdot 10^4$ узлов), а четыре – для области диэлектрика (по $1 \cdot 10^4$ узлов). Минимальный шаг сетки вблизи правого края открытого электрода $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

На рис. 1–3 показано изменение плотности различных химических элементов \mathbf{n} плазмы диэлектрического барьерного разряда в пространстве и во времени при $\varphi^{\max} = 7$ кВ [9] и частоте 5 кГц, а также плотность результирующего объемного заряда ρ и компоненты силы Лоренца f_x, f_y , отнесенные к единице объема. Здесь же приведены распределения суммарного $\varphi = \varphi_{el} + \varphi_{\rho, \sigma}$, приложенного φ_{el} электрических потенциалов, а также распределения потенциала от объемного и поверхностного зарядов $\varphi_{\rho, \sigma}$ и модуля напряженности электрического поля $|E|$.

Механизм формирования и развития отдельного микроразряда состоит из трех последовательных стадий (рис. 1–3). На первой стадии с увеличением приложенного напряжения φ_{el} (рис. 1 д) происходит рост напряженности электрического поля вблизи правого края открытого электрода (рис. 1 ж). Это приводит к частичной ионизации воздуха в этой области (рис. 1 а) за счет формирования электронных лавин. На этой стадии концентрация заряженных частиц настолько мала, что результирующий объемный заряд практически не оказывает влияния на внешнее электрическое поле от электродов (рис. 1 г–е). Четырнадцать рисунков группы (а) представляют собой распределение плотности частиц плазмы в порядке расположения компонент вектора

$$\mathbf{n} = \left[n_{N_4^+}, n_{N_2^+}, n_{N_2(A^3\Sigma_u^+)}, n_{N_2(B^3\Pi_g)}, n_{N_2(a^1\Sigma_u^-)}, n_{N_2(C^3\Pi_u)}, n_{O_4^+}, n_{O_2^+}, n_{O_2^-}, n_{O^-}, n_{O}, n_{O_2(a^1\Delta_g)}, n_{O_2(b^1\Sigma_g^+)}, n_e \right]^T$$

для момента времени $2,500677 \cdot 10^{-5}$ с. Количественные значения распределений параметров приведены в табл. 1. Электроны, ускоряясь в электрическом поле, ионизируют молекулы азота и кислорода вблизи правого края открытого электрода, формируя электронные лавины, а при попадании на поверхность электрода поглощаются анодом. Когда напряженность электрического поля достигает величины порядка 10^7 В/м, в прианодном слое происходит значительный рост плотности результирующего заряда ρ , образованного положительными ионами азота и кислорода (рис. 1 б). Первая стадия микроразряда длилась $2,5007 \cdot 10^{-5}$ с.

На второй стадии процесса происходит лавинно-стримерный переход, при котором электрическое поле пространственного заряда головки лавины достигает внешнего. В этом случае потенциал от объемного заряда $\varphi_{\rho, \sigma}$ достигает величины приложенного напряжения φ_{el} , что приводит к формированию катодонаправленного стримера. В дальнейшем воздух ионизируется благодаря сильному собственному полю стримерной головки (рис. 2 и 3), что приводит к развитию стримера ($t = 2,500850 \cdot 10^{-5}$ с и $t = 2,504733 \cdot 10^{-5}$ с). Стример начинает распространяться от анода и движется над поверхностью диэлектрика. Внутри канала стримера плотность результирующего заряда близка к нулю и существенна лишь на поверхности, особенно в головке стримера (рис. 2 б и 3 б). В результате напряженность внутри стримерного канала значительно ниже, чем вне стримера (рис. 2 ж и 3 ж), что хорошо согласуется с имеющимися физическими представлениями.

На рис. 2 ж видно как потенциал объемного и поверхностного зарядов $\varphi_{\rho, \sigma}$ искажает распределение приложенного потенциала (рис. 2 д). По результатам численного моделирования рассчитаны радиус стримерного канала $10^{-4} \div 10^{-3}$ м, плотность частиц в нём $10^{19} \div 10^{20}$ м⁻³, степень ионизации воздуха $10^{-6} \div 10^{-5}$. Скорость роста стримера порядка 10^6 м/с, что хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными [4]. Продолжительность второй стадии соответствует времени зарождения и распространения стримера, и приблизительно равна $4,3 \cdot 10^{-8}$ с.

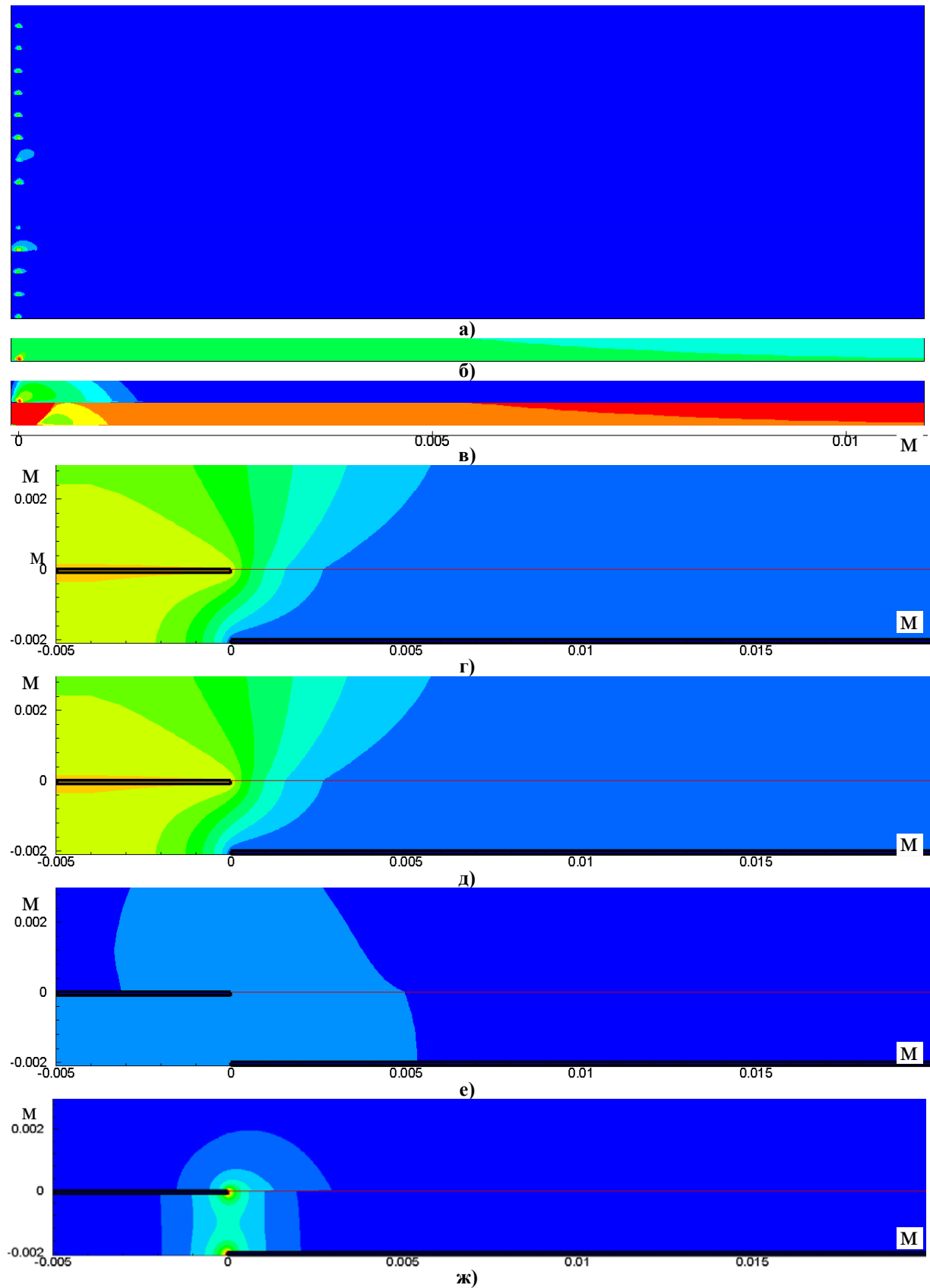


Рис. 1. Распределение плотности химических элементов плазмы (а), объемного заряда (б), компонент силы Лоренца (в), суммарного (г), приложенного (д) электрических потенциалов, а также потенциала от объемного и поверхностного зарядов (е) и модуля напряженности электрического поля (ж) для момента времени $2.500772 \cdot 10^{-5}$ с.

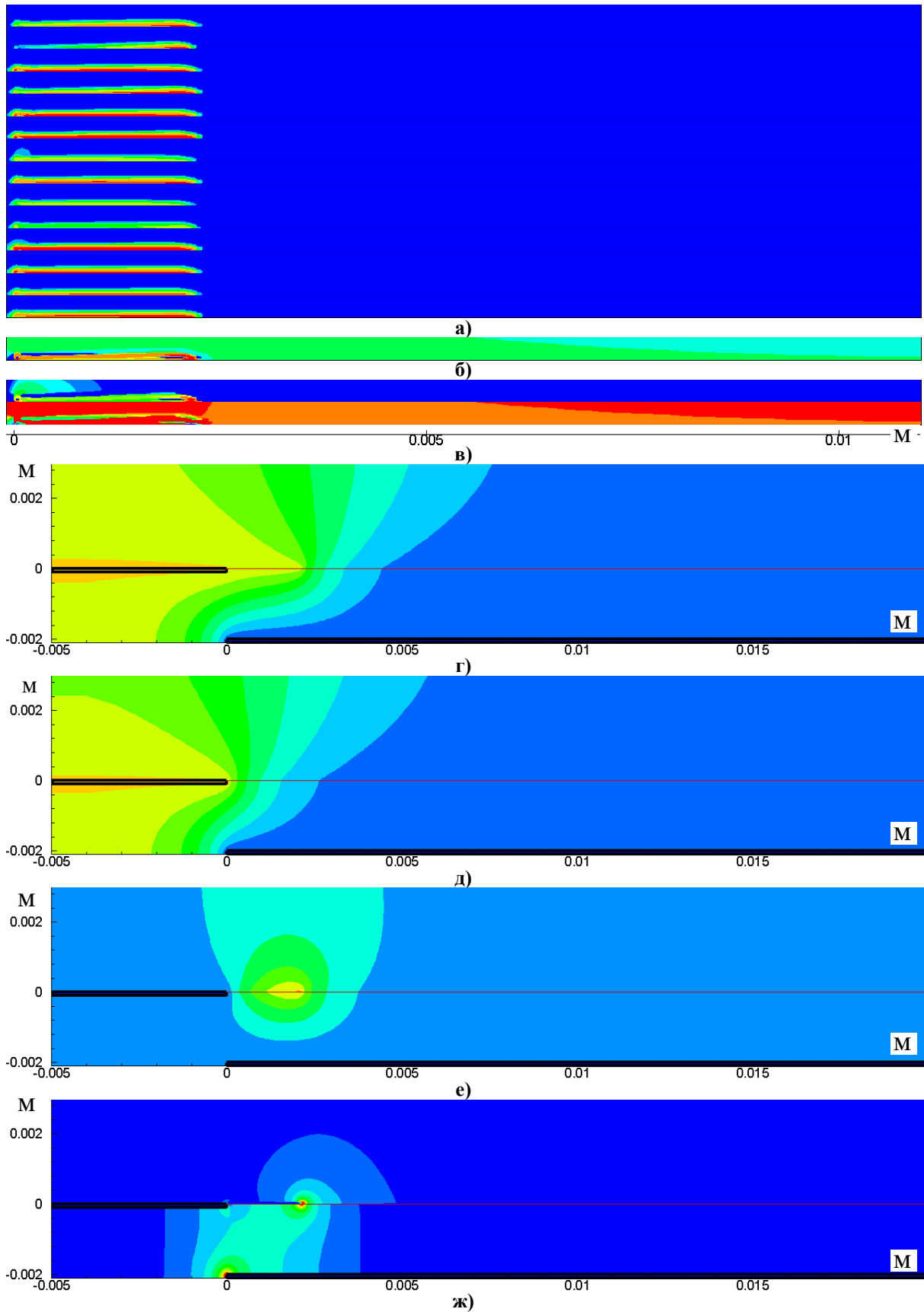


Рис. 2. Распределение плотности химических элементов плазмы (а), объемного заряда (б), компонент силы Лоренца (в), суммарного (г), приложенного (д) электрического потенциалов, а также потенциала от объемного и поверхностного зарядов (е) и модуля напряженности электрического поля (ж) для момента времени $2.500850 \cdot 10^{-5}$ с.

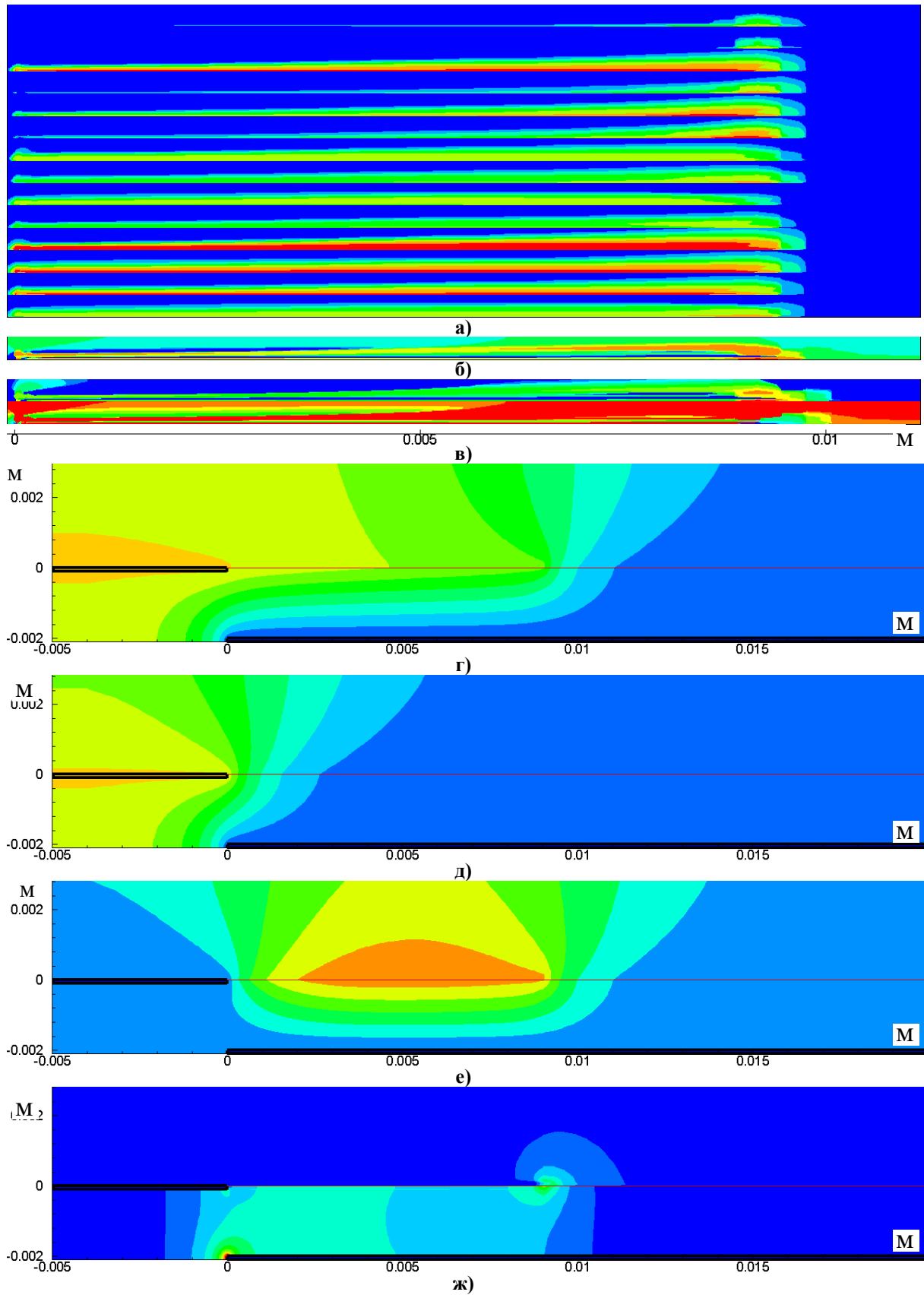


Рис. 3. Распределение плотности химических элементов плазмы (а), объемного заряда (б), компонент силы Лоренца (в), суммарного (г), приложенного (д) электрических потенциалов, а также потенциала от объемного и поверхностного зарядов (е) и модуля напряженности электрического поля (ж) для момента времени $2.504733 \cdot 10^{-5}$ с.

Таблиця 1

Количественные значения распределений параметров						
$n, 1/\text{м}^3$	$\rho, \text{Кл}/\text{м}^3$	$f_x, \text{Н}/\text{м}^3$	$f_y, \text{Н}/\text{м}^3$	$\varphi/\varphi^{\max}, \varphi_{el}/\varphi^{\max}$	$\varphi_{\rho,\sigma}/\varphi^{\max}$	$ E , \text{В}/\text{м}$
1e+21 1e+20 1e+19 1e+18 1e+17 1e+16	1 0,05 0,01 0,005 0 -0,005 -0,01	1e+7 1e+6 1e+5 1e+4 1e+3 1e+2 1e+1 0	0 -1e+1 -1e+2 -1e+3 -1e+4 -1e+5 -1e+6 -1e+7	0,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1 0	0,6 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1 0	1e+7 9e+6 8e+6 7e+6 6e+6 5e+6 4e+6 3e+6 2e+6 1e+6

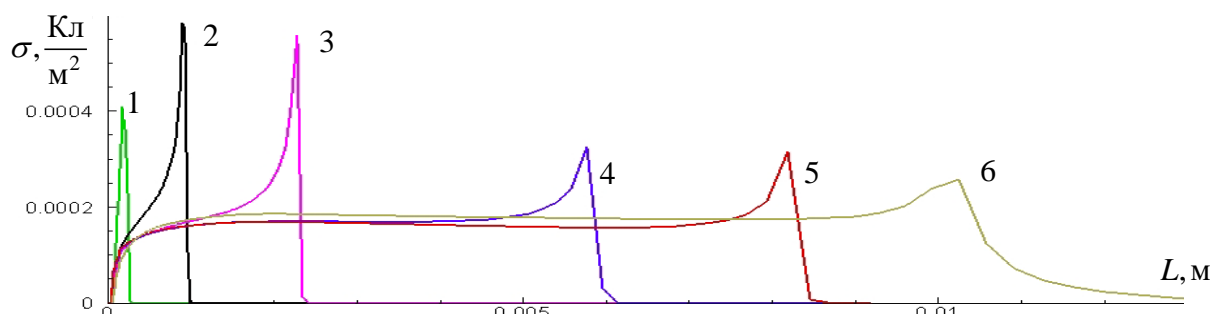


Рис. 4. Распределение поверхностного заряда на диэлектрике для различных моментов времени (1 – $2.500772 \cdot 10^{-5}$ с, 2 – $2.500850 \cdot 10^{-5}$ с, 3 – $2.501045 \cdot 10^{-5}$ с, 4 – $2.502314 \cdot 10^{-5}$ с, 5 – $2.504733 \cdot 10^{-5}$ с, 6 – $5.0 \cdot 10^{-5}$ с).

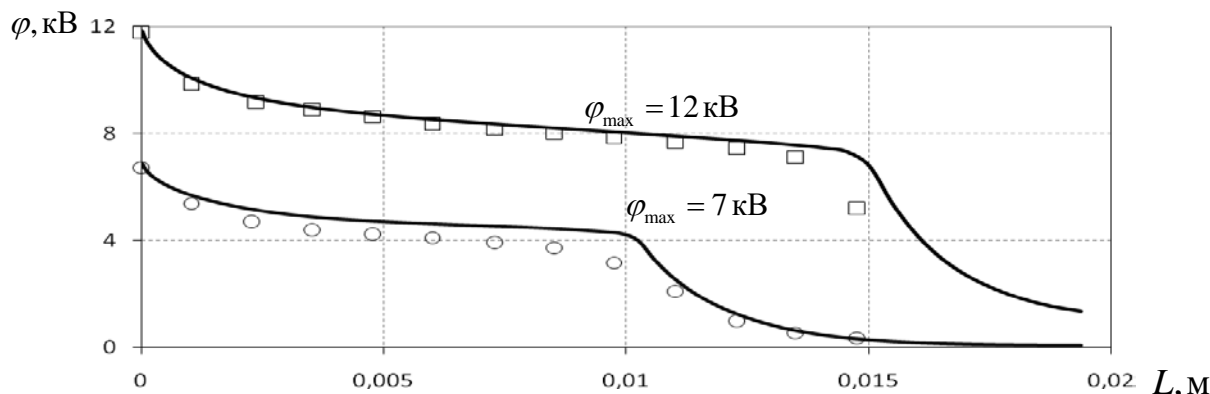


Рис. 5. Распределение электрического потенциала по поверхности диэлектрика (— – настоящая работа, ○ – [9], □ – [10])

При развитии стримера поверхность диэлектрика заряжается, поскольку образующийся объемный заряд при движении в электрическом поле встречает препятствие в виде поверхности диэлектрика и оседает на ней. Адсорбированный заряд искажает поле разрядного промежутка. В результате чего напряженность электрического поля в воздухе вблизи электродов ослабевает (рис. 3 ж), что приводит к затуханию разряда. Положительный заряд на поверхности диэлектрика обеспечивают в основном ионы азота N_4^+ и кислорода O_4^+ . Распределение поверхностного заряда на диэлектрике (рис. 4) приведено для различных моментов времени (1 – $2,500772 \cdot 10^{-5}$ с, 2 – $2,500850 \cdot 10^{-5}$ с, 3 – $2,501045 \cdot 10^{-5}$ с, 4 – $2,502314 \cdot 10^{-5}$ с, 5 – $2,504733 \cdot 10^{-5}$ с, 6 – $5,0 \cdot 10^{-5}$ с).

На третьей стадии основную роль играют процессы диффузии и дрейфа заряженных частиц к диэлектрической поверхности и открытому электроду. Длительность последней стадии микроразряда порядка $2,495 \cdot 10^{-5}$ с.

Получено распределение электрического потенциала по поверхности диэлектрика при максимальном приложенном к электродам напряжении 7 и 12 кВ (рис. 5). Сплошной линией (—) обозначены результаты настоящей работы, а экспериментальные данные \circ – [9], \square – [10]. Резкое падение напряжения на диэлектрике обусловлено длиной распространения стримера и, как следствие, падением плотности поверхностного заряда. Так при максимальных значениях приложенного напряжения 7 и 12 кВ длина распространения стримера составляет $L = 0,01$ м и $L = 0,015$ м, соответственно. Результаты численного моделирования показывают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Выводы

Построена новая физически обоснованная математическая модель низкотемпературной плазмы диэлектрического барьерного разряда в воздухе для описания пространственно-временной структуры, которая качественно и количественно воспроизводит нестационарные электродинамические, плазмохимические процессы и кинетические явления при частичной ионизации воздуха плазменными актуаторами. Основной особенностью разработанной численно-аналитической модели является использование рационального количества уравнений для описания всех основных нестационарных параметров диэлектрического барьерного разряда в воздухе. Выбранные 14 видов частиц обеспечивают высокую точность математического моделирования основных плазмохимических реакций, включая как поверхностные процессы, так и быстротекущие явления в пространстве (развитие стримера и электронных лавин).

Список использованной литературы

1. Редчиц Д. А., Моисеенко С. В. Математическое моделирование дозвукового турбулентного обтекания колеблющегося профиля NASA 0015. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2018. № 2. С. 133–145. DOI: 10.32782/2618-0340-2018-2-133-145.
2. Prikhod'ko A. A., Redtchits D. A. Numerical Modeling of a Viscous Incompressible Unsteady Separated Flow Past a Rotating Cylinder. *Fluid Dynamics*. 2009. Vol. 44, № 6. P. 823–829. DOI: 10.1134/S0015462809060040.
3. Redchits D. O., Shkvar E. A., Moiseienko S. V. Control of Karman Vortex Street by using Plasma Actuators. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2019. Vol. 15, № 5. P. 509–525. DOI: 10.32604/fdmp.2019.08266.
4. Abe T., Takagaki M. Momentum Coupling and Flow Induction in a DBD Plasma Actuator. *AIAA Paper*. 2009. № 4068. 8 p. DOI: 10.2514/6.2009-4068.
5. Hagelaar G. J., Pitchford L. C. Solving the Boltzmann Equation to Obtain Electron Transport Coefficients and Rate Coefficients for Fluid Models. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005. Vol. 14, № 4. P. 722–733. DOI: 10.1088/0963-0252/14/4/011.
6. Forte M., Jolibois J., Moreau E., Touchard G., Cazalens M. Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non-Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity—Application to Airflow Control. *AIAA Paper*. 2006. № 2863. 9 p. DOI: 10.2514/6.2006-2863.
7. Kossyi A. Yu., Matveyev A. A., Silakov V. P. Kinetic Scheme of the Non-Equilibrium Discharge in Nitrogen-Oxygen Mixtures. *Plasma Sources Science and Technology*. 1992. Vol. 1, № 3. P. 207–220. DOI: 10.1088/0963-0252/1/3/011.
8. Nudnova M., Kindusheva S., Aleksahdrov N., Starikovskiy A. Rate of Plasma Thermalization of Pulsed Nanosecond Surface Dielectric Barrier Discharge. *AIAA Paper*. 2010. № 465. 15 p. DOI: 10.2514/6.2010-465.

9. Enloe C., McLaughlin T., Gregory J., Medina R., Miller W. Surface Potential and Electric Field Structure in the Aerodynamic Plasma Actuator. *AIAA Paper*. 2008. № 1103. 11 p. DOI: 10.2514/6.2008-1103.
10. Font G., Enloe C., Newcomb J., Teague, A., Vasso A. Effects of Oxygen Content on the Behavior of the Dielectric Barrier Discharge Aerodynamic Plasma Actuator. *AIAA Paper*. 2010. № 545. 16 p. DOI: 10.2514/6.2010-545.

References

1. Redchyts, D. O. & Moiseienko, S. V. (2018). Matematicheskoe modelirovanie dozvukovogo turbulentnogo obtekaniya koleblyuschegosya profilya NACA 0015. *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання*. **2**, 133–145. DOI: 10.32782/2618-0340-2018-2-133-145.
2. Prikhod'ko, A. A. & Redtchits, D. A. (2009). Numerical Modeling of a Viscous Incompressible Unsteady Separated Flow Past a Rotating Cylinder. *Fluid Dynamics*. **44**, 6, 823–829. DOI: 10.1134/S0015462809060040.
3. Redchyts, D. O., Shkvar, E. A. & Moiseienko S. V. (2019). Control of Karman Vortex Street by using Plasma Actuators. *Fluid Dynamics and Materials Processing*. **15**, 5, 509–525. DOI: 10.32604/fdmp.2019.08266.
4. Abe, T. & Takagaki, M. (2009). Momentum Coupling and Flow Induction in a DBD Plasma Actuator. *AIAA Paper*. **4068**, 8 p. DOI: 10.2514/6.2009-4068.
5. Hagelaar, G. J. & Pitchford, L. C. (2005). Solving the Boltzmann Equation to Obtain Electron Transport Coefficients and Rate Coefficients for Fluid Models. *Plasma Sources Sci. Technol.* **14**, 4, 722–733. DOI: 10.1088/0963-0252/14/4/011.
6. Forte, M., Jolibois, J., Moreau, E., Touchard, G. & Cazalens, M. (2006). Optimization of a Dielectric Barrier Discharge Actuator by Stationary and Non-Stationary Measurements of the Induced Flow Velocity – Application to Airflow Control. *AIAA Paper*. **2863**, 9 p. DOI: 10.2514/6.2006-2863.
7. Kossyi, A., Kostinsky, A., Matveyev, A. & Silakov, V. (1992). Kinetic Scheme of the Non-Equilibrium Discharge in Nitrogen-Oxygen Mixtures. *Plasma Sources Science and Technology. Technical Physics*. **1**, 3, 207–220. DOI: 10.1088/0963-0252/1/3/011.
8. Nudnova, M., Kindusheva, S., Aleksahdrov, N. & Starikovskiy, A. (2010). Rate of Plasma Thermalization of Pulsed Nanosecond Surface Dielectric Barrier Discharge. *Technical Physics*. **465**, 15 p. DOI: 10.2514/6.2010-465.
9. Enloe, C., McLaughlin, T., Gregory, J. & Medina, R. (2008). Surface Potential and Electric Field Structure in the Aerodynamic Plasma Actuator. *AIAA Paper*. **1103**, 11 p. DOI: 10.2514/6.2008-1103.
10. Font, G., Enloe, C., Newcomb, J., Teague, A., Vasso, A. (2010). Effects of Oxygen Content on the Behavior of the Dielectric Barrier Discharge Aerodynamic Plasma Actuator. *AIAA Paper*. **545**, 16 p. DOI: 10.2514/6.2010-545.

Редчиц Дмитрий Александрович – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник отдела новых и нетрадиционных видов транспорта Института транспортных систем и технологий НАН Украины, e-mail: redchits_da@ua.fm, ORCID: 0000-0001-8538-6026.

Тарасов Сергей Васильевич – к.т.н., заведующий отделом технической механики и энергетических систем Института транспортных систем и технологий НАН Украины, e-mail: tsv@westa-inter.com, ORCID: 0000-0002-9254-1503.

Тарасов Андрей Сергеевич – младший научный сотрудник отдела сверхпроводящих левитирующих систем Института транспортных систем и технологий НАН Украины, e-mail: tarik2004@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9524-6510.

Моисеенко Светлана Викторовна – к.т.н., доцент кафедры высшей математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета, e-mail: 4moiseenko@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5802-3887.

УДК 004.93.1

С.А. РОЖКОВ, Н.Я. ХЛОПЕНКО, К.В. ТИМОФЕЕВ, Т.И. ТЕРНОВАЯ
Херсонская государственная морская академия
А.Е. СОКОЛОВ
Херсонский государственный технический университет

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕОРИИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Распознавание образов, пожалуй, одна из самых широко освещенных в литературе задача информационных технологий. Множество методов и удачных решений создало пеструю картину «сложности» задачи. При этом следует обратить внимание на тот факт, что мы имеем дело именно с информационной технологией – методами и средствами обработки информации. Теория информации отличается тем, что имеется масса толкований содержания понятия информация. Это и неопределенность, и количество символов, и ожидаемое воздействие, где каждый из авторов, решая некоторую свою задачу, давал собственное определение содержания этого понятия. При этом процесс построения систем распознавания всегда требует общего подхода к синтезу алгоритмов и методов.

Данная работа посвящена развитию теоретических методов теории информации применительно к задаче создания информационных систем распознавания образов. В основе работы предложен механизм соответствий, что позволяет полагаться на общность полученных результатов. Основная цель работы состоит в дополнении подходов и формализации к построению моделей процессов получения, передачи, обработки и хранения информации в информационном пространстве. На основе анализа системы распознавания образов в информационном пространстве в работе рассмотрены общие подходы к построению алгоритмов распознавания образов. Одним из основных результатов работы является обоснование и демонстрация эффективности методов информационного пространства, использование общих методов соответствий и общих принципов. В частности, принципа необратимости времени и принципа оптимальности, которые позволяют предположить, что математические модели и алгоритмы в информационном пространстве обладают свойством общности.

Рассмотрен пример решения задачи распознавания при реализации системы анализа сцены, где показаны методы синтеза алгоритма системы и независимость информационной структуры системы от методов и уровней реализации системы компенсации информационных потоков.

Ключевые слова: информация; информационное пространство; система распознавания; нечеткое множество; информационный поток.

С.О. РОЖКОВ, М.Я. ХЛОПЕНКО, К.В. ТИМОФЕЄВ, Т.І. ТЕРНОВА
Херсонська державна морська академія
А.Є. СОКОЛОВ
Херсонський державний технічний університет

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ТЕОРІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ. МЕТОДИ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ ПРИ АНАЛІЗІ СЦЕНИ

Розпізнавання образів, мабуть, є одним з найбільш широко висвітлених в літературі завдань інформаційних технологій. Безліч методів і вдалих рішень створили строкату картину «складності» задачі. При цьому слід звернути увагу на той факт, що ми маємо справу саме з інформаційною технологією - методами та засобами обробки інформації. Теорія інформації відрізняється тим, що є маса тлумачень змісту поняття інформація. Це і невизначеність, і кількість символів і очікуваний результат, де кожен з авторів, вирішуючи деяку свою задачу, давав власне визначення змісту цього поняття. При цьому процес побудованої системи розташування завжди вимагає публічного підходу до синтезу алгоритмів і методів.

Дана робота присвячена розвитку теоретичних методів теорії інформації стосовно до задачі створення інформаційних систем розпізнавання образів. В основі роботи запропоновано механізм відповідностей, що дозволяє покладатися на спільність отриманих результатів. Основна мета роботи полягає в доповненні підходів і формалізації до побудови моделей процесів отримання, передачі, обробки та зберігання інформації в інформаційному просторі. На основі аналізу системи розпізнавання образів в інформаційному просторі в роботі розглянуті загальні підходи до побудови алгоритмів розпізнавання образів. Одним з основних результатів роботи є обґрунтування та демонстрація ефективності методів інформаційного простору, використання загальних методів відповідностей і загальних принципів. Зокрема, принципу незворотності часу і принципу оптимальності, які дозволяють припустити, що математичні моделі і алгоритми в інформаційному просторі мають властивість спільності.

Розглянуто приклади розв'язання задач розпізнавання при реалізації системи аналізу сцени, де показані методи синтезу алгоритму системи і незалежність інформаційної структури системи від методів і рівнів реалізації системи компенсації інформаційних потоків.

Ключові слова: інформація; інформаційний простір; система розпізнавання; нечітка множина; інформаційний потік.

S. ROZHKOVA, M. KHLOPENKO, K. TIMOFEEV, T. TERNOVA

Kherson State Maritime Academy

A. SOKOLOV

Kherson State Technical University

INFORMATION TECHNOLOGIES IN THEORY RECOGNITION OF IMAGES. METHOD OF CONSTRUCTING MODELS AT SCENE ANALYSIS

Pattern recognition is perhaps one of the most widely covered information technology problems in the literature. A multitude of methods and successful solutions created a motley picture of the "complexity" of the problem. At the same time, attention should be paid to the fact that we are dealing with information technology - methods and means of information processing. Information theory differs in that there is a mass of interpretations of the content of the concept of information. This is uncertainty, and the number of symbols and the expected impact, where each of the authors, solving some of his own problem, gave his own definition of the content of this concept. Moreover, the process of building recognition systems always requires a general approach to the synthesis of algorithms and methods. This work is devoted to the development of theoretical methods of information theory in relation to the problem of creating information systems for pattern recognition.

The work is based on a correspondence mechanism, which allows relying on the generality of the results obtained. The main goal of the work is to supplement the approaches and formalization to the construction of models of the processes of receiving, transferring,

processing and storing information in the information space. Based on the analysis of the pattern recognition system in the information space, the work considers general approaches to the construction of pattern recognition algorithms. One of the main results of the work is the substantiation and demonstration of the effectiveness of information space methods, the use of general correspondence methods and general principles. In particular, the principle of irreversibility of time and the principle of optimality, which allow us to assume that mathematical models and algorithms in the information space have the property of generality.

An example of solving the recognition problem in the implementation of a scene analysis system is considered, which shows methods for synthesizing the system's algorithm and the independence of the information structure of the system from the methods and levels of implementation of the system for compensating information flows.

Keywords: information; information space; recognition system; fuzzy set; information flow.

Постановка проблемы

Развитие современных методов теоретических основ систем распознавания, как информационных систем, позволяют повысить надежность распознавания и анализа сцен. Целый ряд исследований, основанный на поиске общего подхода к построению алгоритмов распознавания [20–21] и позволил получить существенное развитие этих результатов [22–24]. Однако по-прежнему сохраняется множество попыток создания эвристических алгоритмов.

Анализируя информационные системы, как направление теоретических исследований, следует обратить внимания на декларативность термина «информация». При этом, если в системах передачи информации теоретическая основа – это именно теория информации, то во многих приложениях теория информации применяется достаточно вольно («лепное украшение»).

Собственно понятие «информационное пространство» – это множество событий, наделенное некоторой структурой. В данном случае это норма и метрика. Это определение не претендует на традиционные, красочные определения, а опирается просто на строгий математический аппарат.

Анализ последних исследований и публикаций

Повсеместное использования вычислительной техники и развитие технических средств и программного обеспечения информационных систем обуславливает значительный интерес к проблемам развития и совершенствования элементов теории информации. к проблемам развития основ системологического анализа управления информационными системами и происходящими в них информационными процессами, как основам методологии построения моделей систем и процессов, передачи, обработки и хранения информации.

Современное состояние и развитие теории информации, связанное с трудами Р.Хартли, Н. Винера, А.Н. Колмогорова, К. Шеннона, Д. Неймана, У. Эшби, Д. Маккея, А.Я. Хинчина, В.А. Котельникова, В.Д. Гопы, А.М. Яглома и многих других ученых [1–10] к сегодняшнему дню сформировалось в законченную теорию, обеспечивающую решение многих задач.

Цель исследования

Основная цель работы состоит в дополнении подходов и формализации к построению моделей процессов получения, передачи, обработки и хранения информации в информационном пространстве. На основе анализа системы

распознавания образов в информационном пространстве в работе будут рассмотрены общие подходы к построению алгоритмов распознавания образов.

Изложение основного материала исследования

Для простоты изложения используем меру Хартли [11, 17] и покажем, что это функциональная связь и существует обратная функция [25–26]

$$I(x) = -\log P(x) \rightarrow I = f(p) \rightarrow P = f^{-1}(I) \rightarrow P = P(I). \quad (1)$$

Собственно в (1) нет противоречий, но есть важное следствие

$$\frac{dP}{dx} \geq 0 \rightarrow \text{If } \frac{dP}{dx} \neq 0 \rightarrow x = x(P) \rightarrow x = x(I). \quad (2)$$

Учитывая, что x – это событие, можно утверждать, что информация в (2) определяет величину причинно-следственной связи события x . Это определение не противоречит существующим определениям даже в упрощенной форме информация – это причина события.

Представим зависимость вероятности от информации в виде ряда, учитывая аналитичность выражения (1)

$$P = P(I^*) + \frac{1}{2} \frac{dP}{dI} \Big|_{I^*} \Delta I + \frac{1}{2} \frac{d^2P}{dI^2} \Big|_{I^*} \Delta I^2 + \dots + R. \quad (3)$$

Как следствие (3) для линейного приближения получаем уравнение, решение которого $P(x, C)$ позволяет определить правило оценки информации с учетом начальных $I(0)$ и граничных $I(1)$ условий

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dP}{dI} = \varphi(x, P); \\ I(0) = I_0 \\ I(1) = I_1 \end{array} \right\} \rightarrow P = f(I) \rightarrow I = f^{-1}(P). \quad (4)$$

Выражение (4) основывается на знании особенностей процесса в пространстве событий и их отражения в вероятностном пространстве, над которым строится оценка информации. Предполагая, что выполняется условие органического роста, Хартли получил меру информации для $I(0) = \infty$ и $I(1) = 0$ в виде

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dP}{dI} = -\lambda P; \\ I(0) = \infty \\ I(1) = 0 \end{array} \right\} \rightarrow \ln(P) = -\lambda I + C \rightarrow I = -\frac{1}{\lambda} \ln(P). \quad (5)$$

Доопределив λ в (5), получим стандартное выражение для оценки информации

$$\lambda = \log_a e \rightarrow I = -\log_a(P). \quad (6)$$

Здесь важно учитывать смысл вероятностной модели и тот факт, что информация определяется над нормированным метрическим вероятностным пространством с нормой и метрикой [27]:

$$\|\omega\| = P(\omega); \quad a(\omega_i, \omega_j) = 1 - P(\omega_i / \omega_j). \quad (7)$$

Например, наблюдая область отправления и область прибытия для соответствия $(A, B, Q) = q$ можно построить соответствие с оценкой графика Q^* – моделью процесса или явления, которое в самом общем случае описывается данным соответствием [24]

$$(A, B, Q) = q \approx (A, B, Q^*) = q^*. \quad (8)$$

Для модели в вероятностном пространстве задача оценки графика соответствия в пространстве событий не ставится. Здесь определяется средняя оценка тесноты связи событий $ab = \omega$ с объектом или процессом, описываемым соответствием p .

$$\left. \begin{array}{l} \|A\| = P_A \\ \|B\| = P_B \\ Q = P \end{array} \right\} \rightarrow (P_A, P_B, P) = p. \quad (9)$$

Таким образом, задача изучения вероятностных характеристик и построения вероятностных моделей решается в вероятностном пространстве. Собственно, это справедливо для большинства моделей, которые строятся в соответствующих пространствах, что позволяет оценивать как величину элемента, так и различие или расстояние между элементами.

Над вероятностным пространством формируется новое пространство, где нормой служит оценка величины причинно-следственной связи (2) – информация. Особенностью данного случая является нарушение аксиомы симметрии, что связано с необратимостью времени в пространстве событий. Следовательно, получаем нормированное метрическое пространство с нормой и несимметричной метрикой

$$\begin{aligned} \|\omega\| &= -\log_a P(\bar{\omega}) = I(\bar{\omega}); \\ a(\omega_i, \omega_j) &= -\log_a P(\overline{\omega_i \setminus \omega_j}) = I(\overline{\omega_i \setminus \omega_j}). \end{aligned} \quad (10)$$

Это нормированное, метрическое пространство, где основным является оценка информации, целесообразно назвать информационным пространством (в данном случае – пространством Хартли). При этом мера Хартли (1) не является нормой, что и подчеркивает определение оценки информации по Хартли как меры.

Далее появляется вопрос о единственности нормы и метрики (10) информационного пространства. Ответ на этот вопрос дает выражение (4), которое связано со свойствами процесса, порождающего события.

Учитывая тот факт, что объектов и процессов множество, то для информационного пространства существует множество соответствующих им норм и метрик. Следовательно, пространство Хартли, как и современная теория информации, только частный случай информационного пространства.

Необходимо отметить, что для пространства событий Ω математическая модель (8) описывает связь событий. Для модели в вероятностном пространстве и модели в информационном пространстве получаем информационную модель (11), которая отображает изменения степени причинно-следственных связей в системе.

$$(P_A, P_B, P^*) = p \leftrightarrow (I_A, I_B^*, Q_I^*) = q(I). \quad (11)$$

Следует также учитывать ожидаемые оценки информации, так как математическое ожидание нормы (10) в информационном пространстве определяется как энтропия

$$M\{I\} = M\{\|\omega\|\} = -\sum_{i=1}^n P(\omega_i) \log_a P(\bar{\omega}_i) = H(\bar{\omega}). \quad (12)$$

Математическое ожидание метрики (10), в информационном пространстве определяет ожидаемое отклонение информации

$$M\{a(\omega_i, \omega_j)\} = M\{I_\varepsilon\} = -\sum \sum P(\omega_i \setminus \omega_j) \log_a P(\overline{\omega_i \setminus \omega_j}) = H(\overline{\omega_i \setminus \omega_j}). \quad (13)$$

В отличие от энтропии, построенной на мере Хартли, это оценка не ожидаемой величины элемента пространства, а ожидаемая мера, определенная для этого пространства

$$M\{I\} = -\sum_{i=1}^n P(\omega_i) \log_a P(\omega_i) = H(\omega). \quad (14)$$

При этом для естественных, природных систем (систем, созданных без влияния человека), справедлива гипотеза оптимальности, которую можно сформировать как «информационные процессы оптимальны». Разумеется, гипотеза оптимальности только гипотеза, но она позволяет формировать подход к синтезу информационных систем. С другой стороны, в каждый конкретный момент времени причина не опережает следствие, и, следовательно, информация всегда передается только в одном направлении – от передатчика А к приемнику В. Таким образом, для элементарной информационной системы можно выделить четыре состояния, где состояние передачи принимаем как 1, а состояние приема информации как 0.

В случае, когда источников много, а приемник один, возникает вопрос: возможно ли считать, что приемник принимает всю информацию сразу от всех источников? Для элементарной системы нельзя, а для композиции элементарных систем можно, при условии, что передаваемое сообщение формируется до момента передачи. В табл. 1 показаны состояния элементарной системы передачи информации.

Таблица 1

Состояния элементарной системы передачи информации

Состояние	Процесс в элементарной системе
A=0, B=0	Отсутствие информационного потока
A=1, B=0	Передача информации от источника А к приемнику В
A=0, B=1	Передача информации от источника В к приемнику А
A=1, B=1	Компенсация информационного потока А потоком В

Учитывая принцип необратимости времени, композиция элементарных информационных систем остается элементарной в каждый момент времени. При этом компенсация информационных потоков связана с формированием потока, оцениваемого метрикой данного информационного пространства.

Передаваемая информация может отличаться от информации, принимаемой приемником на информацию, уже существующую к моменту приема в приемнике. Здесь существует вполне простая теория информационного пространства, однако основным моментом является формирование модели информационных потоков. Например, для источника сообщений A и приемника B формируется модель информационной модели, как соответствие (15)

$$(I_A, I_B, Q_I^*) = q(I) \leftrightarrow (I_B, I_A^*, Q_I^{*-1}) = q^{-1}(I) \rightarrow I_\varepsilon = a(I_A, I_A^*). \quad (15)$$

Собственно, соответствие (15) утверждает тот простой факт, что модель, построенная приемником, должна быть адекватна модели, породившей информационный поток передатчика. Следовательно, возможно получить «обращенную» модель, которая обеспечивает минимальное отклонение генерируемого ею потока информации от входного потока информации.

При оценке адекватности модели можно использовать метрику информационного пространства, при этом – это общий метод, и к нему могут быть сведены все методы оценки расстояний в теории распознавания.

Таким образом, формируется утверждение, что алгоритм распознавания всегда имеет алгоритм построения модели передаваемой информации и операцию обращения модели приемника. При этом расстояние между потоками информации, которые генерируют источник и обращенная модель приемника, даёт оценку качества распознавания образа, генерируемого источником.

Учитывая принцип оптимальности, получаем обобщенный алгоритм распознавания (16), где достаточно просто обратить модель приемника и сравнить (компенсировать) информационные потоки:

$$\left. \begin{aligned} Q_I^{*-1} &\rightarrow \inf \{ I_\varepsilon \}; \\ I_\varepsilon &= a(I_A, I_A^*) \\ (I_A, I_B, Q_I^*) &= q(I) \\ (I_B, I_A^*, Q_I^{*-1}) &= q^{-1}(I) \end{aligned} \right\}. \quad (16)$$

Утверждение (16), при своей достаточной простоте, получено без ограничений для соответствий и, следовательно, к нему может быть сведена любая модель. Важным следствием этого является теорема реализуемости идеальной системы распознавания: отсутствие ошибок распознавания достижимо тогда и только тогда, когда приёмник может воспроизвести любой сигнал передатчика [28].

Особенностью систем распознавания является их иерархическая организация, которая связана с ограничением определения множеств. Любое множество обусловлено как кортеж D , или как нечеткое множество, заданное по заданию F , или как множество M , заданное по перечислению.

В табл. 2 показано, как при формировании модели приёмника происходит обработка информации.

Таким образом, в пространстве сигналов модель формируется как оператор или функция, или как линии границ. Модель для второго уровня содержит правила принадлежности и собственно нечеткие подмножества – образы, описывающие основные характеристики объектов, где модель формируется как совокупность множеств, характерных для объекта. Третий уровень модели формируется как

логическое описание свойств и взаимосвязей объект и оперирует с множествами, заданными по перечислению.

Таблица 2

Иерархия моделей в системе распознавания образов

Уровень системы	Пространство и его множество	Задача
$(D_A, D_B, Q_D^*) = q_1(I)$	Пространство сигналов	$Q_D^{*-1} \rightarrow \inf \{I_\varepsilon\}$
	Упорядоченное множество	$\left. \begin{aligned} I_\varepsilon &= a(I_{DA}, I_{DA}^*) \\ (I_A, I_B, Q_I^*) &= q(I) \\ (I_B, I_A^*, Q_I^{*-1}) &= q^{-1}(I) \end{aligned} \right\}$
$(F_A, F_B, Q_F^*) = q_2(I)$	Пространство образов	$Q_F^{*-1} \rightarrow \inf \{I_\varepsilon\}$
	Множество по заданию	$\left. \begin{aligned} I_\varepsilon &= a(I_{FA}, I_{FA}^*) \\ (I_A, I_B, Q_I^*) &= q(I) \\ (I_B, I_A^*, Q_I^{*-1}) &= q^{-1}(I) \end{aligned} \right\}$
$(M_A, M_B, Q_M^*) = q_3(I)$	Пространство гипотез	$Q_I^{*-1} \rightarrow \inf \{I_\varepsilon\}$
	Множество по определению	$\left. \begin{aligned} I_\varepsilon &= a(I_{MA}, I_{MA}^*) \\ (I_A, I_B, Q_I^*) &= q(I) \\ (I_B, I_A^*, Q_I^{*-1}) &= q^{-1}(I) \end{aligned} \right\}$

Условие отсутствия ошибки сводится к условию невырожденности моделей, входящих в композицию (17)

$$\left. \begin{aligned} (D_A, D_B, Q_D^*) &= q_1(I) \\ (F_A, F_B, Q_F^*) &= q_2(I) \\ (M_A, M_B, Q_M^*) &= q_3(I) \end{aligned} \right\} \rightarrow (D_A, M_B, Q_D^* \circ Q_F^* \circ Q_M^*) = q_1(I) \circ q_2(I) \circ q_3(I) = g(I). \quad (17)$$

Это соответствует условию невырожденности соответствия (16) и приводит к невырожденности всех соответствий в композиции (17). Таким образом, для отсутствия ошибки распознавания необходимо и достаточно выполнение условия (18):

$$\left(M_B, D_A, (Q_D^* \circ Q_F^* \circ Q_M^*)^{-1} \right) = \left(M_B, D_A, (Q_M^{*-1} \circ Q_F^{*-1} \circ Q_D^{*-1})^{-1} \right) = g^{-1}(I). \quad (18)$$

С учетом возмущений и ошибок из выражений (16) и (17) можно реализовать три оптимизационные процедуры. Для первого уровня получим сравнение потока входных сигналов и их моделей (19):

$$\left. \begin{aligned} Q_D^{*-1} &\rightarrow \inf \{I_\varepsilon\}; \\ I_\varepsilon &= a(I_D, I_D^*) \\ (I_D, I_F, Q_I^*) &= q_1(I) \\ (I_F^*, I_D^*, Q_I^{*-1}) &= q_1^{-1}(I) \end{aligned} \right\}. \quad (19)$$

Следовательно, может быть построен оптимальный алгоритм распознавания с замыканием обратной связи непосредственно в пространстве сигналов. Как правило, это всевозможные признаковые системы, где модель порождает правило принятия решения.

Более сложным является алгоритм с компенсацией в пространстве образов (20) [29-33]. Здесь реализуется процедура построения образа и его трансляция в пространство сигналов.

$$Q_F^{*-1} \rightarrow \inf \{I_\varepsilon\};$$

$$\left. \begin{array}{l} I_\varepsilon = a(I_F, I_F^*) \\ (I_F, I_M^*, Q_F^*) = q_2(I) \\ (I_M^*, I_F^*, Q_F^{*-1}) = q_2^{-1}(I) \end{array} \right\} \rightarrow \left. \begin{array}{l} I_\varepsilon = a(I_D, I_D^*) \\ (I_D, I_M, Q_D^* \circ Q_F^*) = q_1(I) \circ q_2(I) \\ (I_M^*, I_D^*, Q_M^{*-1} \circ Q_F^{-1}) = q_2^{-1}(I) \circ q_1^{-1}(I) \end{array} \right\}. \quad (20)$$

И наиболее полный, третий, алгоритм формируется с учетом логического описания образа в пространстве логических описаний образа с использованием множества наименований (21)

$$Q_M^{*-1} \rightarrow \inf \{I_\varepsilon\};$$

$$\left. \begin{array}{l} I_\varepsilon = a(I_M, I_M^*) \\ (I_M, \tilde{I}_M, Q_I^*) = q_3(I) \\ (\tilde{I}_M, I_M^*, Q_I^{*-1}) = q_3^{-1}(I) \end{array} \right\} \rightarrow \left. \begin{array}{l} I_\varepsilon = a(I_D, I_D^*) \\ (I_D, I_M^*, Q_D^* \circ Q_F^* \circ Q_M^*) = q_1(I) \circ q_2(I) \circ q_3(I) \\ (I_M^*, I_D^*, Q_M^{*-1} \circ Q_F^{-1}) = q_3^{-1}(I) \circ q_2^{-1}(I) \circ q_1^{-1}(I) \end{array} \right\}. \quad (21)$$

Таким образом, каждый уровень системы имеет свою обратную связь, которая задействована в процессе обучения и проверки гипотезы формируемой моделью. При этом в процессе формирования модели есть различие, связанное с обучением и процессом принятия решения. Основной процедурой в процессе обучения является решение задач (19), (20) и (21) для ожидаемого – энтропии модели как источника. При этом при принятии решения ищется модель, минимизирующая мгновенное отклонение потоков.

Особенностью процесса построения оптимальной модели обучения является использование не меры Хартли [11], а нормы и метрики информационного пространства. Действительно, если оценивать полезность признака по информации Хартли, получаем парадокс, при котором наиболее ценны несущественные признаки. В то время как норма информационного пространства существенные признаки оценивает выше. Таким образом, при формировании алгоритма обучения возникает оптимизационная процедура выбора признаков ω или построения фильтра Q :

$$\omega_i \in \Omega, \quad i = \overline{1, n}; \quad \omega_i = \omega_i^*, \quad \text{if } P_{\omega_i} \rightarrow \max \quad \leftrightarrow \quad \text{if } I_{\omega_i} \rightarrow \max;$$

$$Q^*(\omega) \rightarrow \max H(\|\omega\|). \quad (22)$$

Следовательно, для задачи распознавания при построении алгоритма обработки информации в информационном пространстве достаточно использовать аппарат соответствий и свойств информационных потоков. Однако для реализации признаковой системы или фильтра необходимо использовать норму и метрику информационного пространства.

Весьма важным является то, что вся цепочка рассуждений основана на свойствах наиболее общих математических структур – множеств, соответствий и свойствах нормированного метрического пространства. Действительно, нам не потребовалось вводить дополнительные ограничения и полученные результаты отвечают условиям общности. Можно изобрести что угодно, но нельзя выйти за пределы свойств множеств, соответствий и информационных потоков.

На рис. 1 схематично показана система распознавания в информационном пространстве.

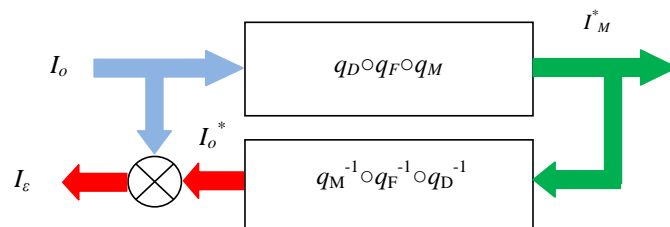


Рис. 1. Структура системы распознавания в информационном пространстве.

В общем случае преобразование информации в системе распознавания описывается соответствием множеств. Алгоритм распознавания в информационном пространстве разбивается на три уровня: обработка упорядоченных множеств, обработка нечетких множеств и обработка множеств заданных по перечислению. При этом любая задача распознавания в информационном пространстве имеет одинаковый алгоритм. Так как полученный алгоритм реализован для наиболее общих структур, то к нему могут быть сведены любые алгоритмы распознавания образов в информационном пространстве.

Рассмотрим пример решения задачи распознавания при реализации системы анализа сцены (рис. 2, а). При этом следует обратить внимание на методы синтеза алгоритма системы и независимость информационной структуры системы от методов и уровней реализации системы компенсации информационных потоков.

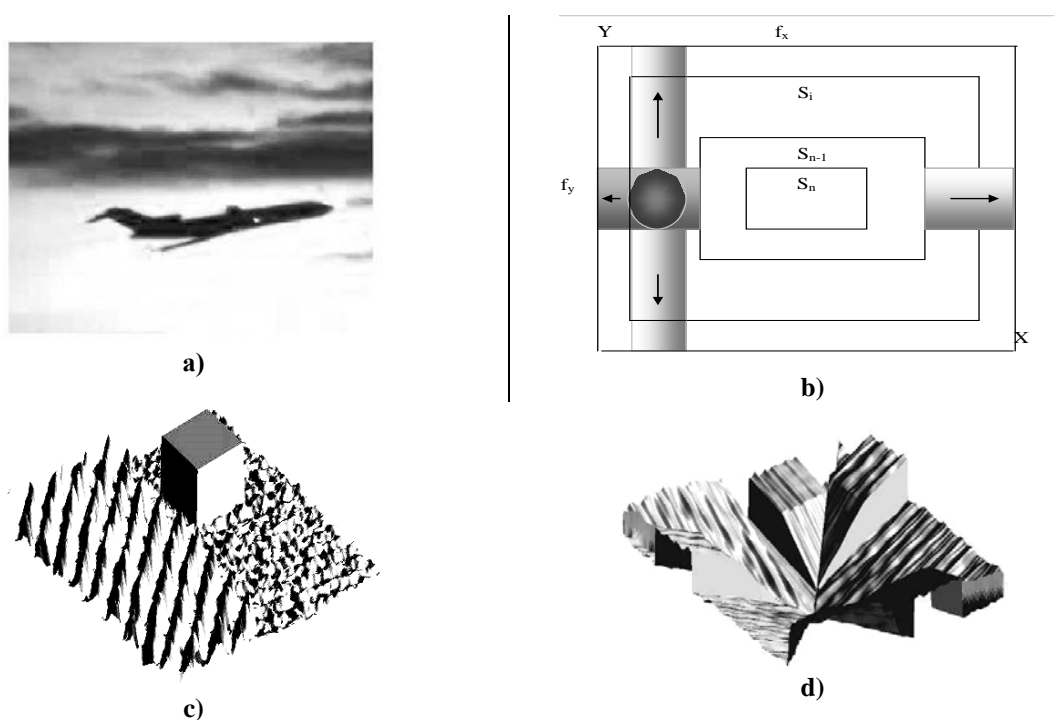


Рис. 2. Исходная сцена (а) и формирование матрицы проекций (b, c, d).

Для случая компенсации информационного потока на уровне образов $I_\varepsilon = a(I_F, I_F^*)$ формируется модель на уровне описания образа и обеспечивается формирование входных сигналов, совместимых с сигналами на уровне генерации образа [29 – 33].

Первый шаг любого алгоритма анализа сцены – это фрагментация сцены [13, 14 19–21]. В данном случае для функции изображения $f(x, y)$ используется проективное преобразование, имеющее обратное преобразование Радона:

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{f}_{y_i}^*(x, y_{mi}) &= \int_0^{y_{mi}} \overset{\circ}{f}^*(x, y) dy, & \overset{\circ}{f}_{y_i}(x + x_0, y_{mi}) &= \int_0^{y_m} \overset{\circ}{f}(x + x_0, y) dy; \\ \overset{\circ}{f}_{x_i}^*(y, x_{mi}) &= \int_0^{x_{mi}} \overset{\circ}{f}^*(x, y) dx, & \overset{\circ}{f}_{x_i}(y + y_0, x_{mi}) &= \int_0^{x_{mi}} \overset{\circ}{f}^*(x, y + y_0) dx. \end{aligned} \quad (23)$$

При проективном преобразовании (29) вдоль оси X теряется информация о положении объектов по направлению проектирования, однако сохраняются координаты в направлении Y . И наоборот, проектирование вдоль оси Y сохраняет координаты по X .

Данный недостаток преобразования несущественен при одиночном изображении или в случае, когда применим покоординатный алгоритм. Но в общем случае потеря информации о координатах объекта нежелательна, что ведет к последовательному формированию зон, содержащих различные элементы сцены.

Поскольку в задаче позиционирования основным является совмещение центра кадра и центра интересующего изображения, разобьем поле S на подкадры S_1, S_2, \dots, S_n . В каждом подкадре S_i получаем проективное преобразование – матрицу проекций (рис. 2, b). В этом случае координата частного изображения восстанавливается с точностью до принадлежности изображения к подкадру. Важно, что при анализе изображения по проекциям количество точек проекции только $2n$, в то время как внутренность области имеет n^2 точек, (рис. 2, c, d).

За счет накопления компенсирующих изображений формируется «увиденное» системой изображение (рис. 3, a). Поскольку основой формирования этого нового изображения является использование функции принадлежности, то полученное поле изображения (рис. 3, b) также имеет смысл функции принадлежности.

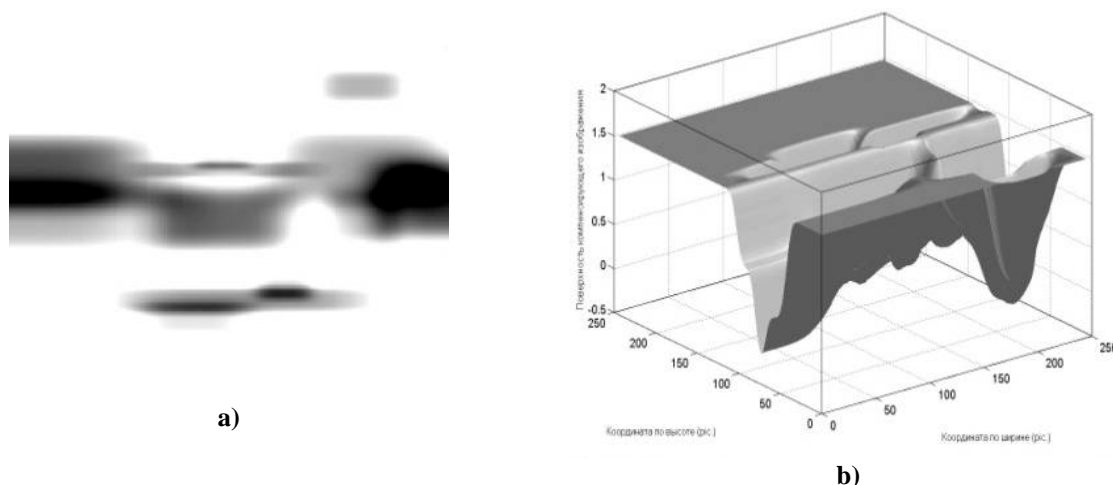


Рис. 3. Синтезированное при компенсации изображение сцены: а) компенсирующее изображение; б) функция принадлежности.

Выделяя особенности в матрице проекций (рис. 3, b) получаем «окна» для выделения фрагментов сцены (рис. 4).

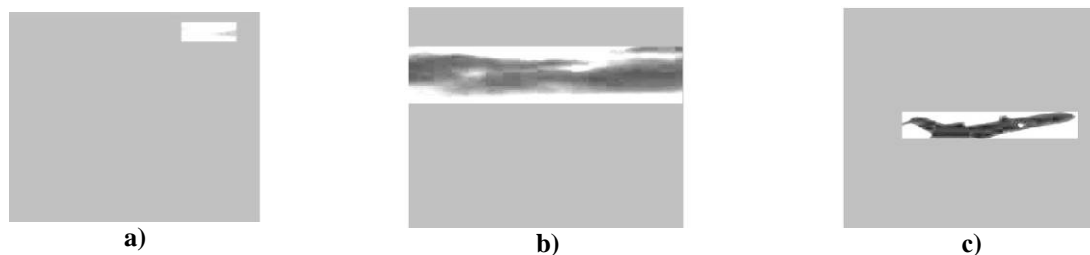


Рис. 4. Последовательность формирования окон в изображении сцены.

После выделения «окон» сцена легко фрагментируется на существенные фрагменты, распознавание которых обеспечивает описание сцены (рис. 5).



Рис. 5. Окончательный результат фрагментации сцены.

По такому алгоритму производится построение модели сцены. При этом процедура идентификации распространяется не только на основной, идентифицируемый объект, но и на объекты, которые выступают в роли помехи. Разумеется, правильность идентификации помех не определяет качество работы системы, но обеспечивает инвариантность системы идентификации от состава сцены.

Выводы

1. Информационное пространство является нормированным метрическим пространством над множеством событий. Разнообразие процессов, порождающих события, определяет разнообразие норм и метрик для информационного пространства, а необратимость времени определяет однонаправленность информационного потока.
2. Информация позволяет оценивать степень причинно-следственной связи, её норма оценивает причину события, а метрика – это различие между причинами событий. Информационные системы (в частности системы распознавания образов) обладают иерархией, обусловливаемую типами множеств, над которыми они определены: упорядоченные множества, нечеткие множества и множества, заданные по перечислению. Наиболее общими моделями в информационном пространстве являются соответствия.
3. Алгоритмы, построенные в информационном пространстве с учетом иерархии являются наиболее простыми и общими для конкретных типов информационных систем. Алгоритм, полученный в информационном пространстве, переводится в пространство событий, что позволяет его реализовать. Методы информационного пространства являются перспективным направлением анализа и синтеза алгоритмов информационных систем.

Список использованной литературы

1. Zhang H., Li D. Applications of Computer Vision Techniques to Cotton Foreign Matter Inspection: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2014. Vol. 109. P. 59–70. DOI: 10.1016/j.compag.2014.09.004.
2. Tadhg B., Sun Da-Wen. Inspection and Grading of Agricultural and Food Products by Computer Vision Systems: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2002. Vol. 36. Issue 2–3. P. 193–213. DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00101-1.
3. Wenzhu Yang et al. A New Approach for Image Processing in Foreign Fiber Detection. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2009. Vol. 68. Issue 1. P. 68–77. DOI: 10.1016/j.compag.2009.04.005
4. Yang W., Li D., Wei X., et al. An Automated Visual Inspection System for Foreign Fiber Detection in Lint. *2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems*. Vol. 4. (China, Xia Men, May 19–21 2009). P. 364–368.
5. Yang W., Li D., Wang S., Lu S., et al. Saliency-Based Color Image Segmentation in Foreign Fiber Detection. *Mathematical and Computer Modelling*. 2013. Vol. 58. Issue 3–4. P. 852–858.
6. Zhao X., Li D., Yang W., et al. Feature Selection for Cotton Foreign Fiber Objects Based on Improved and Colony Algorithm. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2011. Vol. 42. Issue 4. P. 168–173. (in Chinese with English abstract).
7. Wang R., Liu S., Wang Q., et al. Classification Features of Feather and Hemp in Cotton Foreign Fibers. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. 2012. Vol. 28. Issue 2. P. 202–207.
8. Russakovsky O., Deng J., Su H., et al. Image NET large scale visual recognition challenge. *International Journal of Computer Vision*. 2015. Vol. 115. Issue 3. P. 211–252.
9. Fine T. L. Feedforward Neural Network Methodology. Berlin: Springer Science Business Media, 2006. 356 p.
10. Ramesh B., Bhardwaj A., Richardson J., et al. Optimization and Evaluation of Image- and Signal-Processing Kernels on the TI C6678 Multi-Core DSP. *IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*. (USA, Waltham, September 9–11, 2014). 6 p.
11. Hartley R. V. L. Transmission of Information. *Bell System Technical Journal*. 1928. Vol. 7. Issue 3. P. 535–563.
12. Sokolov A. Sokolova O. Solving the Task of Measuring Information Quantity through Model Identification with Minimization of the Estimation Error. *Проблеми інформаційних технологій*. 2016. № 2(20). С. 56–62.
13. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L. Digital Image Processing Using MATLAB. Pearson Prentice-Hall, 2004. 609 p.
14. Pratt W. K. Introduction to Digital Image Processing. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013. 756 p.
15. Тимофеев А. В. Адаптивные робототехнические комплексы. Л.: Машиностроение, 1988. 332 с.
16. Стратонович Р. Л. Теория информации. М.: Сов. радио, 1975. 424 с.
17. Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987. 304 с.
18. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 824 с.
19. Huang T. S. (Ed.) Image Sequence Processing and Dynamic Scene Analysis. Berlin: Springer, 1983. 759 p.

20. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1978. 412 с.
21. Гренадер У. Лекции по теории образов: Анализ образов. Т. 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 488 с.
22. Soares A. M., Fernandes B. J. T., Bastos-Filho C. J. A. Pyramidal Neural Networks with Evolved Variable Receptive Fields. *Neural Computing and Applications*. 2016. Vol. 29. Issue 12. P. 1443–1453. DOI:10.1007/s00521-016-2656-2.
23. Bottou L. Large-Scale Machine Learning with Stochastic Gradient Descent. *COMPSTAT'2010: 19th International Conference on Computational Statistics (France, Paris, August 22-27, 2010)*. Paris: Springer, 2010. P. 177–186.
24. Ramesh B., Bhardwaj A., Richardson J., et al. Optimization and Evaluation of Image- and Signal-Processing Kernels on the TI C6678 multi-core DSP. *IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*. (USA, Waltham, September 9–11, 2014). 6 p.
25. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1976. 543 с.
26. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. 7-е изд. М.: Физматлит, 2004. 572 с.
27. Яглом А. М., Яглом И. М. Вероятность и информация. М.: КомКнига, 2007. 512 с.
28. Hodakov V., Kozel V., Sokolov A. Analysis of Information Technology of the Management System of the Higher Educational Institution. *Technology Audit and production reserves*. 2017. № 4(2). С. 4–12.
29. Рожков С. О. Методи і засоби оцінки якості тканин у системах керування текстильним виробництвом: Монографія. Херсон: Олді-Плюс, 2011. 318 с.
30. Бражник Д. О. Модели и методы повышения устойчивости к возмущениям в системах оптической идентификации: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Херсонский национальный технический университет. Херсон, 2012.
31. Рожков С. А., Бражник Д. А. Использование нейросетевых структур для построения систем распознавания образов. *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы*, 2004. № 2(14). С.247–253.
32. Tkach V. A., Kashtalyan P. V., Rozhkov S. A. Monitoring and Control Systems of Modern Intellectual Interfaces. *IEEE 4th International Conference Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. (Kyiv, October 18-20, 2016). P. 237–240. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783151.

References

1. Zhang, H., & Li, D. (2014). Applications of Computer Vision Techniques to Cotton Foreign Matter Inspection: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture*. **109**, 59–70. DOI: 10.1016/j.compag.2014.09.004.
2. Tadhg, B., & Sun, Da-Wen. (2002). Inspection and Grading of Agricultural and Food Products by Computer Vision Systems: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture*. **36**, 2–3, 193–213. DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00101-1.
3. Wenzhu, Yang et al. (2009). A New Approach for Image Processing in Foreign Fiber Detection. *Computers and Electronics in Agriculture*. **68**, 1, 68–77. DOI: 10.1016/j.compag.2009.04.005
4. Yang, W., Li D., & Wie, X., et al. (2009). An Automated Visual Inspection System for Foreign Fiber Detection in Lint. *Proceedings of the 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems*. Vol. 4. (China, Xia Men, May 19–21 2009), pp. 364–368.
5. Yang, W., Li, D., Wang, S., & Lu, S., et al. (2013). Saliency-Based Color Image Segmentation in Foreign Fiber Detection. *Mathematical and Computer Modelling*. **58**, 3–4, 852–858.

6. Zhao, X., Li, D., & Yang, W., et al. (2011). Feature Selection for Cotton Foreign Fiber Objects Based on Improved and Colony Algorithm. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. **42**, 4, 168–173. (in Chinese with English abstract).
7. Wang, R., Liu, S., & Wang, Q., et al. (2012). Classification Features of Feather and Hemp in Cotton Foreign Fibers. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*. **28**, 2, 202–207.
8. Russakovsky, O., Deng, J., & Su, H., et al. (2015). Image NET large scale visual recognition challenge. *International Journal of Computer Vision*. **115**, 3, 211–252.
9. Fine, T. L. (2006). *Feedforward Neural Network Methodology*. Berlin: Springer Science Business Media.
10. Ramesh, B., Bhardwaj, A., Richardson, J., et al. (2014). Optimization and Evaluation of Image- and Signal-Processing Kernels on the TI C6678 Multi-Core DSP. *Proceedings of the IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*. (USA, Waltham, September 9–11, 2014), 6 p.
11. Hartley, R. V. L. (1928). Transmission of Information. *Bell System Technical Journal*. **7**, 3, 535–563.
12. Sokolov, A. & Sokolova, O. (2016). Solving the Task of Measuring Information Quantity through Model Identification with Minimization of the Estimation Error. *Проблеми інформаційних технологій*. **2**(20), 56–62.
13. Gonzalez, R. C., Woods, R. E., & Eddins, S. L. (2004). *Digital Image Processing Using MATLAB*. Pearson Prentice-Hall.
14. Pratt, W. K. (2013). *Introduction to Digital Image Processing*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.
15. Тумофєєв, А. В. (1988). *Adaptive Robotic Technical Complexes*. L.: Mechanical Engineering.
16. Stratanovich, R. L. (1975). *Information Theory*. M.: Soviet Radio.
17. Kolmogorov, A. N. (1987). *The theory of the Information and the Theory of Algorithms*. M.: Science.
18. Shannon, K. (1963). *Works on the Theory of the Information and Cybernetics*. Moscow: Publishing house of the foreign literature.
19. Huang, T. S. (Ed.) (1983). *Image Sequence Processing and Dynamic Scene Analysis*. Berlin: Springer.
20. Ту, Дзх., Gonsales, R. (1978). *Principy raspoznavanija obrazov*. Moscow: Mir.
21. Grenander, U. (1978). *Pattern Analysis Lectures in Pattern Theory*. Vol. II. Moscow: Mir.
22. Soares, A. M., Fernandes, B. J. T., Bastos-Filho, C. J. A. (2016). Pyramidal Neural Networks with Evolved Variable Receptive Fields. *Neural Computing and Applications*. **29**, 12, 1443–1453. DOI:10.1007/s00521-016-2656-2.
23. Bottou L. (2010). Large-Scale Machine Learning with Stochastic Gradient Descent. *Proceedings of the COMPSTAT'2010: 19th International Conference on Computational Statistics* (France, Paris, August 22-27, 2010). Paris: Springer, pp. 177–186.
24. Ramesh B., Bhardwaj A., Richardson J., et al. Optimization and Evaluation of Image- and Signal-Processing Kernels on the TI C6678 multi-core DSP. *Proceedings of the IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*. (USA, Waltham, September 9–11, 2014), 6 p.
25. Kolmogorov, A. N., & Fomin, S. V. (1976). *Elements of the Theory of Functions and Functional Analysis*. M.: Nauka.
26. Kolmogorov, A. N., & Fomin, S. V. (2004). *Elements of the Theory of Functions and the Functional Analysis*. 7th edition. M.: Fizmatlit.

27. Jaglom, A. M., & Jaglom, I. M. (2007). *Verojatnost' i informacija*. Moscow: KomKniga.
28. Hodakov, V., Kozel, V., Sokolov, A. (2017). Analysis of Information Technology of the Management System of the Higher Educational Institution. *Technology Audit and production reserves*. 4(2), 4–12.
29. Rozhkov, S. O. (2011). *Methods and means of quality assessment of fabrics in textile production management systems: Monograph*. Kherson: Oldi-Plus.
30. Brazhnik, D. O. (2012). *Models and methods of increasing resistance to disturbances in optical identification systems (Candidate of Engineering Sciences Thesis)*. Kherson. National Technical University. Kherson.
31. Rozhkov, S. O., & Brazhnik, D. O. (2004). Using neural network structures to build pattern recognition systems. *Automation. Electrical complexes and systems*. 2(14), 247–253.
32. Tkach V. A., Kashtalyan P. V., & Rozhkov S. A. (2016). Monitoring and Control Systems of Modern Intellectual Interfaces. Proceedings of the *IEEE 4th International Conference Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. (Kyiv, October 18-20, 2016), pp. 237–240. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783151.

Рожков Сергій Олександрович – д.т.н., професор, завідувач кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: rozhkov_ser@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-1662-004X.

Хлопенко Микола Якович – д.т.н., професор кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: khlopenko.n@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7773-4721.

Тимофеев Костянтин Васильович – к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: kvtimofeev@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-8668-6159.

Тернова Тетяна Іванівна – к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: tti.kherson@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1902-6804.

Соколов Андрій Євгенович – к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету, e-mail: sokolovandrew84@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8442-6137.

УДК 004.9, 004.428.4

Н.О. СОКОЛОВА, А.С. БЕЛОВ
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІОТ-СИСТЕМИ НА АПАРАТНІЙ ПЛАТФОРМІ ARDUINO

Ринок ІоТ-систем швидко та бурхливо розвивається та складає мільярди доларів. Інтернет речей охоплює всі сфери діяльності людини від розумних невеличких гаджетів до розумних міст, концепція яких реалізована а державному рівні. Інтернет речей, або «ІоТ» – це розширення потужності Інтернету за межами комп'ютерів та смартфонів на цілий ряд інших речей, процесів та середовищ. За останні кілька років ІоТ став однією з найважливіших технологій 21 століття. За допомогою недорогих обчислень, хмарних технологій, великих даних, аналітики та мобільних технологій фізичні речі можуть обмінюватися та збирати дані з мінімальним втручанням людини. У цьому гіперпов'язаному світі цифрові системи можуть записувати, контролювати та регулювати кожну взаємодію між підключеними речами. Фізичний світ відповідає цифровому світу, і вони співпрацюють.

Враховуючи постійно зростаючу кількість підключених пристроїв, ІоТ продовжує свій шлях еволюції, додаючи різні шари до даних, які вже обмінюються та обробляються, і створюючи складні алгоритми, що призводять до поліпшення рівня автоматизації. І завдяки різноманітності «речей», які можна з цим пов'язати, ІоТ дозволив використовувати різноманітні програми як для окремих користувачів, так і для цілих галузей.

ІоТ в Україні тільки на самому початку шляху і це відкриває простір для створення різноманітних систем з різним призначенням та апаратним наповненням. Дана стаття присвячена огляду стану ІоТ в світі та Україні та опису розробленої ІоТ-системи з використанням апаратної платформи Arduino, сервісу ThingsSpeak та інтерфейсної частини з використанням Telegram-бота. Система була протестована з реалізацією розумного робочого місця з моніторингом показників температури повітря, вологості повітря, кількості вуглецевого газу, яскравості освітлення, атмосферного тиску, своєчасного повідомлення користувача про критичну зміну показників мікроклімату з метою усунення дискомфорту та підвищенню працездатності людини. Тестування також було проведено після певної доробки для системи віддаленого моніторингу мікроклімату столярної майстерні. Тестування показало, що після невеличкої доробки система може використовуватися у різних предметних областях та є дуже економічною.

Ключові слова: ІоТ, Arduino; ІоТ-система; розумне робоче місце; Telegram-бот; розумний будинок; мікроконтролер.

Н.О. СОКОЛОВА, А.С. БЕЛОВ
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ІОТ-СИСТЕМЫ НА АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЕ ARDUINO

Рынок ІоТ-систем быстро и бурно развивается и составляет миллиарды долларов. Интернет вещей охватывает все сферы деятельности человека от разумных небольших гаджетов до разумных городов, концепция которых реализована а государственном уровне. Интернет вещей, или «ІоТ» – это расширение мощности Интернета за пределами компьютеров и смартфонов на целый ряд других вещей,

процессов и сред. За последние несколько лет IoT стал одной из важнейших технологий 21 века. С помощью недорогих вычислений, облачных технологий, больших данных, аналитики и мобильных технологий физические вещи могут обмениваться и собирать данные с минимальным вмешательством человека. В этом гиперсвязанном мире цифровые системы могут записывать, контролировать и регулировать каждое взаимодействие между подключенными вещами. Физический мир соответствует цифровому миру, и они сотрудничают.

Учитывая постоянно растущее количество подключенных устройств, IoT продолжает свой путь эволюции, добавляя различные слои к данным, которые уже обмениваются и обрабатываются, и создавая сложные алгоритмы, приводящие к улучшению уровня автоматизации. И благодаря разнообразию «вещей», которые можно с этим связать, IoT позволил использовать различные программы как для отдельных пользователей, так и для целых отраслей.

IoT в Украине только в самом начале пути и открывает пространство для создания различных систем с разным назначением и аппаратным наполнением. Данная статья посвящена обзору состояния IoT в мире и Украине и описания разработанной IoT-системы с использованием аппаратной платформы Arduino, сервиса ThingsSpeak и интерфейсной части с использованием Telegram-бота. Система была протестирована с реализацией разумного рабочего места с мониторингом показателей температуры воздуха, влажности воздуха, количества углекислого газа, яркости, атмосферного давления, своевременного сообщения о критическом изменении показателей микроклимата в целях устранения дискомфорта и повышения работоспособности человека. Тестирование также было проведено, после определенной доработки, для системы удаленного мониторинга микроклимата столярной мастерской. Тестирование показало, что после небольшой доработки система может использоваться в различных предметных областях и быть очень экономичной.

Ключевые слова: IoT, Arduino; Ион-система; умное рабочее место; Telegram-бот; умный дом; микроконтроллер.

N.O. SOKOLOVA, A.S. BIELOV
Oles Honchar Dnipro National University

DEVELOPMENT OF IoT-SYSTEM SOFTWARE ON ARDUINO HARDWARE PLATFORM

The IoT market is growing rapidly and is in the billions of dollars. The Internet of Things covers all areas of human activity from smart small gadgets to smart cities, the concept of which is implemented at the state level. The Internet of Things, or «IoT», is the extension of the power of the Internet beyond computers and smartphones to a number of other things, processes, and environments. Over the past few years, IoT has become one of the most important technologies of the 21st century. With low-cost computing, cloud technology, big data, analytics and mobile technology, physical things can share and collect data with minimal human intervention. In this hyperconnected world, digital systems can record, monitor and regulate every interaction between connected things. The physical world corresponds to the digital world, and they cooperate.

Given the ever-increasing number of connected devices, IoT continues its evolution by adding different layers to data that is already being exchanged and processed, and creating sophisticated algorithms that improve automation. And thanks to the variety of "things" that can be associated with it, IoT has made it possible to use a variety of applications for both individual users and entire industries.

IoT in Ukraine is just at the beginning of the road and this opens space for the creation of various systems with different purposes and hardware. This article is devoted to an overview of the state of IoT in the world and Ukraine and a description of the developed IoT system using the Arduino hardware platform, the ThingsSpeak service and the interface using the Telegram bot. The system was tested with the implementation of a smart workplace with monitoring of air temperature, humidity, carbon dioxide, lighting brightness, atmospheric pressure, timely user notification of critical changes in microclimate to eliminate discomfort and improve human performance. Testing was also carried out after some refinement for the remote monitoring system of the carpenter's microclimate. Testing has shown that after a little refinement, the system can be used in various subject areas and is very economical.

Keywords: IoT, Arduino, IoT-system; smart workplace; Telegram bot; smart house; microcontroller.

Постановка проблеми

Інтернет речей має можливість кардинально змінити спосіб взаємодії з оточенням. Можливість електронного моніторингу та керування об'єктами у фізичному світі дозволяє наблизити прийняття рішень до даних у нові сфери людської діяльності – оптимізувати ефективність систем та процесів, заощадити час для людей та підприємств та покращити якість життя. Від машин для моніторингу на заводській підлозі до відстеження ходу суден у морі, сенсори можуть допомогти компаніям отримати набагато більше своїх фізичних цінностей, покращуючи продуктивність машин, продовжуючи їх життя та дізнавшись, як їх можна переробити, щоб зробити ще більше. Завдяки портативним носіям та моніторам Інтернет речей має потенціал для значного покращення результатів у різних сферах людської діяльності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Інтернет речей (англ. Internet of Things, IoT) – це концепція мережі із взаємозв'язаних фізичних пристроїв, які мають вбудовані сенсори та виконавчі пристрої, а також програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати передачу і обмін даними між фізичним світом і комп'ютерними системами в автоматичному режимі, за допомогою використання стандартних протоколів зв'язку. Така концепція дозволяє виключити необхідність участі людини, за рахунок використання інтелектуальних інтерфейсів [1]. Вона перетворює звичні речі у нові пристрої, від розумних годинників до розумних міст. Сфера IoT – один із головних світових трендів, її вважають рушієм четвертої індустріальної революції, яка зараз триває у світі. За оцінками глобального інституту МакКінсі Інтернет речей має загальний потенціал економічного впливу від 3,9 трлн. до 11,1 трлн. доларів на рік (близько 11 відсотків світової економіки) у 2025 р [2].

IoT активно формує як індустріальний, так і споживчий світи. Розумні технології знаходять свій шлях до кожної сфери бізнесу та споживача – від роздрібною торгівлі до охорони здоров'я, від фінансів до логістики [3]. На даний момент шалене різноманіття з 21 мільярдів пов'язаних «речей» збирає дані та виконує всілякі завдання [4]. IoT знаходиться в безперервному стані еволюції, кожного року визначаються новітні тренди та тенденції IoT [5–6]. Трендами 2020 року в IoT є штучний інтелект, технологія блокчейн, IoT в галузі охорони здоров'я, персоналізація роздрібною торгівлі, прогнозне обслуговування, хмарні обчислення [7]. В умовах пандемії та глобального карантину на перший план виходять системи дистанційного моніторингу стану здоров'я людини [8].

В світі є приклади державних стратегій «розумного» міста, які мають успіхи у реалізації. Так, стратегія «Смарт-Дубай 2021» надає більше 1000 сервісів двома

десятками державних департаментів та партнерами приватного сектора, які є відповіддю на сучасні виклики і зміни міста. [9].

У Фінляндії розроблена на 2014-2020 роки стратегія «Відкриті та розумні послуги – Six City» [10], до якої залучені найбільші міста-муніципалітети Фінляндії: Гельсінкі, Еспоо, Вантаа, Тампере, Турку і Оулу, де проживає близько 30% населення. Стратегія має три основних напрямки: відкриті інноваційні платформи; відкриті дані та інтерфейси; іідкрита участь в управлінні.

Ринок IoT в Україні ще у початковому стані. За даними liga.net [11] на початку 2019 року тільки 2% постачальників використовували IoT, а 51% взагалі про нього нічого не знали. У 2017-му оператор мобільного зв'язку Lifecell і компанія IoT Ukraine створили першу в Україні спільну лабораторію Інтернету речей. А вже в квітні 2019 року ці фірми розгорнули IoT-мережу в трьох українських містах: Києві, Львові та Кропивницькому [12].

20 лютого 2019 року відбулось засідання Комітету Інтернет асоціації України з питань Інтернету речей, де були намічені ряд конкретних кроків з популяризації і розвитку в Україні цього ринку [13]. На початку 2020 року мобільні оператори України охопили покриттям IoT такі регіони: Харківська область – агробізнес, контроль вологості і температури ґрунтів; Кропивницький – дистанційний збір показників газу; Чернівці – «розумне» управління відходами, контроль якості повітря в приміщенні, СО, СО2, задимлення; Львів – дистанційний збір показників електроенергії; Луцьк – дистанційний збір показників води; Київський регіон – дистанційний збір показників води, Smart Parking, моніторинг навколишнього природного середовища, «розумне» освітлення, логістика, агробізнес, контроль вологості і температури ґрунтів, контроль параметрів зберігання харчових продуктів. Пілотні проекти lifecell стартували в Одесі, Луцьку, Івано-Франківську, Києві і Дніпрі. Компанія Vodafone Україна запустила в комерційну експлуатацію NB-IoT-мережу на основі LTE 1800, підвищив тим самим безпеку та якість передачі даних та встановив у домах обладнання – радіомодулів, які передають показники лічильників води [14]. В світі існує багато комерційних IoT платформ [15]. Поруч із крупними платформами існують безкоштовні хмарні сервіси для роботи з IoT-пристроями, такі як ThingSpeak, Xively, Thingful [16].

Мета дослідження

Метою дослідження є розробка IoT-системи, яка здатна після невеличкої доробки працювати з апаратною частиною на платформі Arduino, сенсори якої моніторять певні фізичні характеристики.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розроблена IoT-система призначена для отримання даних сенсорів апаратної частини, розробленої на платформі Arduino, та має у своєму складі наступні компоненти: персональний комп'ютер, який через COM-порт опитує сенсори та відправляє їх дані на сервер; сервера обробки, аналізу та візуалізації даних ThingSpeak та інтерфейсної частини спілкування з користувачем – Telegram-бота для обробки усіх запитів від користувача та аналізу зміни показників для нотифікації користувача та пристроїв користувача (рис.1).

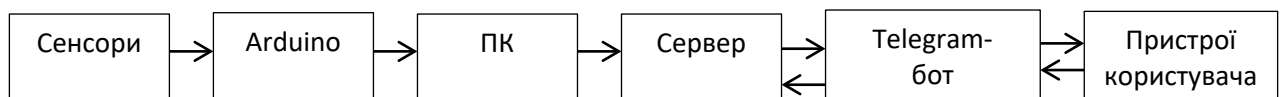


Рис. 1. IoT система.

Програмування мікроконтролерів сімейства Arduino ведеться у безкоштовній середовищі розробки Arduino IDE. Мікроконтролер Arduino зв'язується із комп'ютером через двонаправлений послідовний віртуальний COM-порт згідно з протоколом RS-232. RS-232 (Recommended Standard 232) – це протокол послідовної передачі даних між двома пристроями (інформація передається пакетами по одному байту). Для зчитування даних з цього порта, необхідно знати номер порта, на якому знаходиться сам прилад (Arduino) та параметри швидкості, зазвичай використовуються такі параметри як швидкість у 9600 біт/секунду (бод), та таймаут, який дорівнює 0, тобто порт опитується постійно.

Для створення слухача COM-порту використана високорівнева мова програмування Python. Використовуючи бібліотеку PySerial, яка має готовий механізм роботи з COM портами та готовий функціонал для швидкої розробки, проводимо опитування всіх портів та підключаємось до COM-порта до якого під'єднаний мікроконтролер, і зчитуємо звідти значення з певною частотою (рис.2).

```
Connecting to:COM4
Connecting error! Attempting again...
Connecting to:COM5
Connecting error! Attempting again...
Connecting to:COM6
Connected to: COM6
```

Рис. 2. Пошук програмою потрібного COM порту.

Для колекціонування даних був обраний сервер Things. ThingSpeak™ – це служба платформи аналітики IoT, яка дозволяє агрегувати, візуалізувати та аналізувати потоки даних у хмарі. Також він надає можливість використовувати MATLAB, для аналізу даних IoT та автоматично взаємодіє з користувачем за допомогою сторонніх служб, таких як Twilio® або Twitter® [17].

З метою скорочення кількості процедур передачі даних на сервер відправка даних на сервер здійснюється через однакові проміжки часу. Це виключає ситуації, коли прилад або затримався із отриманням даних від сенсору, а таке можливе із деякими модулями. В код програми опитування COM порту був доданий таймер, який збирає дані протягом 5 хвилин та потім висилає на сервер середнє арифметичне за кожним показником. Таким чином на сервері ми отримуємо дані за 5 хвилин стабільно, без затримок.

У випадку, якщо відправка даних на сервер не була успішною – програма робить одне додаткове коло із опитуванням мікроконтролеру та висилає все на сервер. Так буде продовжуватись до тих пір, поки дані нарешті не будуть відправлені, тобто не буде отримано від сервера статус, що дані успішно отримані. За документацією API від ThingSpeak відомо, що у випадку успішно отриманих даних, сервер повертає 1, у випадку помилки – 0. В коді програми для опитування COM порту використовується API ThingSpeak, дані передаються у форматі JSON, який є загальноприйнятим для передачі даних в схожих випадках.

Для отримання даних та нотифікацій користувача використаний месенджер Telegram. Він є одним із найрозповсюдженіших та має вбудовану підтримку «ботів». Основною ідеєю була думка, про можливість користувача отримати дані з будь-якого сенсору системи простими командами в месенджері, де знаходяться усі переписки із колом спілкування. Для людини немає потреби встановлювати окремі програми, заходити на сайти, тощо. Їй потрібно просто почати спілкуватись із конкретним ботом, якого можна знайти по імені в цьому месенджері. Бот виконується постійно і безперервно опитує сервера Telegram чи не отримане нове повідомлення, якщо

отримане – це повідомлення потрапляє до програми бота та далі виконується обробка команди і формування відповіді на цю команду. Перевагами використання Telegram-боту є швидкість, простота та надійність.

ІоТ-система була протестована на системі розумного робочого місця [17], яке складалося із датчиків температури повітря, вологості повітря, кількості вуглецевого газу, яскравості освітлення, атмосферного тиску. Взаємодія користувача з ботом базується на командах, які користувач отримує від бота як тільки починає бесіду з ним (рис. 3).

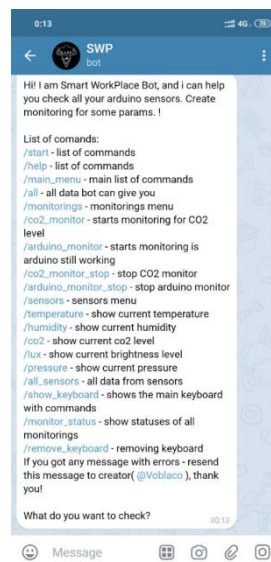


Рис. 3. Команди бота.

Система дозволяє виводити всі параметри системи, або запитувати дані тільки окремих сенсорів (рис. 4). Знак оклику біля значення одного із сенсорів означає що цей параметр знаходиться на межі дозволених значень. Тобто користувачу бажано взяти заходів для покращення саме цього параметра.

Також для перегляду графіків зміни параметрів була створена сторінка, яка використовуючи API сайту ThingsSpeak отримує дані за останню добу та виводить графіки по кожному із сенсорів. (рис. 5).



Рис. 4. Вивід даних по всіх параметрах системи (виконання команди /all).

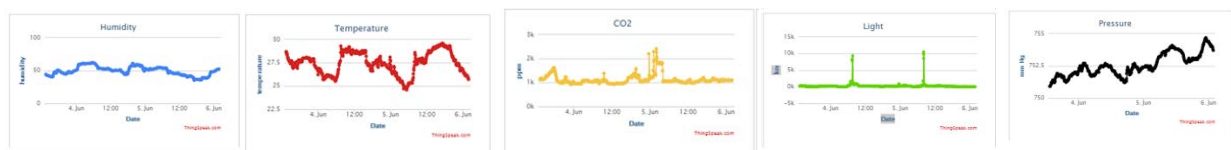


Рис. 5. Графіки змін по усіх сенсорах.

Також дана IoT-система була адаптована та протестована для віддаленого моніторингу мікроклімату столярної майстерні з метою контролю показників вологості та температури при зберіганні цінних порід деревени.

Висновки

Розроблена програмна реалізація IoT-системи на апаратній платформі Arduino, проведено тестування системи для двох різних апаратних реалізацій різного призначення. В подальшому планується адаптація та тестування системи медичного призначення для моніторингу стану здоров'я людини із передачею у разі необхідності даних лікарю.

Список використаної літератури

1. Lake D., Rayes A., Morrow M. The Internet of Things. *The Internet Protocol Journal*. 2012. Vol. 15. № 3. P. 10–19. URL: <https://ipj.dreamhosters.com/wp-content/uploads/issues/2012/ipj15-3.pdf>.
2. The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype. Офіційний сайт McKinsey Global Institute, 2015. URL: [\\$3.9 trillion–11.1 trillion per year in 2025](http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/the_internet_of_things_the_value_of_digitizing_the_physical_world)
3. Knorr Eric. The Internet of Things in 2020: More vital than ever. URL: <https://www.networkworld.com/article/3542891/the-internet-of-things-in-2020-more-vital-than-ever.html>
4. Martin Dylan. The 10 Coolest IoT Devices Of 2020 (So Far) URL: <https://www.crn.com/slideshows/internet-of-things/the-10-coolest-iot-devices-of-2020-so-far-1>
5. Banafa Ahmed. Ten Trends of Internet of Things in 2020. URL: <https://www.bbvaopenmind.com/en/technology/digital-world/ten-trends-of-internet-of-things-2020/>.
6. Blanter Alex, Holman Mark. Internet of Things 2020: A Glimpse into the Future. URL: https://aradinfocenter.com/wp-content/uploads/2017/07/A.T.%20Kearney_Internet%20of%20Things%20Presentation_Online.pdf
7. Laura Andrea. 7 Amazing IoT (Internet of Things) Trends To Keep Your Eye On. URL: <https://elearningindustry.com/iot-internet-of-things-trends-2020>
8. Martin Dylan. 5 Important IoT and AR Applications for the COVID-19 Era. URL: <https://www.crn.com/slideshows/internet-of-things/5-important-iot-and-ar-applications-for-the-covid-19-era/1>
9. Smart Dubai 2021. URL: <https://2021.smartdubai.ae/>
10. Six City Strategy (6Aika). URL: <http://6aika.fi/>
11. Ксендик М. В Украине только 2% поставщиков используют интернет вещей. URL: <https://tech.liga.net/technology/novosti/v-ukraine-tolko-2-postavschikov-ispolzuyut-internet-veschey>
12. Бориславский Б., Тракнов Н. Как IoT, AI и Big Data внедряют и используют в Украине: экспертное мнение представителей Vodafone. URL: <https://aiconference.com.ua/ru/news/kak-iot-ai-i-big-data-vnedryayut-i-ispolzuyut-v-ukraine-ekspertnoe-mnenie-predstaviteley-vodafone-98651>
13. Комітет ІНАУ з питань Інтернету речей визначив конкретні кроки з популяризації і розвитку в Україні цього ринку. URL: <https://inau.ua/news/komitet-inau-z-pytan-internetu-rechey-vuznachyv-konkretni-kroky-z-populyaryzaciyi-i-rozvytku-v>
14. Олиарник М. Медленно и уверенно. Более десятка городов Украины уже подключились к «интернету вещей». URL: <https://ubr.ua/market/telecom/medlenno-i-uverenno-bolee-desyatka-horodov-ukrainy-uzhe-podkljuchilis-k-internetu-veshchej-3890134>

15. Falguni Shah. Microsoft, Amazon & Huawei Lead the Overall IoT Platform Landscape in Completeness; ClearBlade & FogHorn Emerge as Leading Edge-Focused IoT Platforms. URL: <https://www.counterpointresearch.com/microsoft-amazon-clearblade-foghorn-emerge-leading-edge-focused-iot-platforms/>
16. Зубчинський В. В., Терещенко І. К., Шевченко Є. О. Огляд існуючих систем дистанційного контролю пристроїв IoT. *ЗВ'ЯЗОК*. 2019. № 4. С. 56–59
17. Соколова Н. О., Белов А. С. Інформаційна система моніторингу мікроклімату робочого місця. *Вісник ХНТУ*. 2019. № 2(69). Ч. 2. С.250–255.

References

1. Lake, D., Rayes, A., & Morrow, M. (2012). The Internet of Things. *The Internet Protocol Journal*. 15, 3, 10–19. URL: <https://ipj.dreamhosters.com/wp-content/uploads/issues/2012/ipj15-3.pdf>.
2. The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype. Official site of McKinsey Global Institute. Retrieved from: [\\$3.9 trillion–11.1 trillion per year in 2025](http://www.mckinsey.com/insights/business_technology/the_internet_of_things_the_value_of_digitizing_the_physical_world)
3. Knorr, E. (2020). The Internet of Things in 2020: More vital than ever. Retrieved from: <https://www.networkworld.com/article/3542891/the-internet-of-things-in-2020-more-vital-than-ever.html>
4. Martin, D. The 10 Coolest IoT Devices Of 2020 (So Far) Retrieved from: <https://www.crn.com/slide-shows/internet-of-things/the-10-coolest-iot-devices-of-2020-so-far-1>
5. Banafa, A. (2019). Ten Trends of Internet of Things in 2020. 16.12.2019. Retrieved from: <https://www.bbvaopenmind.com/en/technology/digital-world/ten-trends-of-internet-of-things-2020/>.
6. Blanter, A., & Holman M. Internet of Things 2020: A Glimpse into the Future. Retrieved from: https://aradinfocenter.com/wp-content/uploads/2017/07/A.T.%20Kearney_Internet%20of%20Things%202020%20Presentation_Online.pdf
7. Laura, A. (2020). 7 Amazing IoT (Internet of Things) Trends to Keep Your Eye on. Retrieved from: <https://elearningindustry.com/iot-internet-of-things-trends-2020>
8. Martin D. 5 Important IoT and AR Applications for the COVID-19 Era. Retrieved from: <https://www.crn.com/slide-shows/internet-of-things/5-important-iot-and-ar-applications-for-the-covid-19-era/1>
9. Smart Dubai 2021. Retrieved from: <https://2021.smartdubai.ae/>
10. Six City Strategy (6Aika). Retrieved from: <http://6aika.fi/>
11. Ksendzik, M. V. (2019). Ukraine tolko 2% postavschikov ispolzuyut internet vesche. Retrieved from: <https://tech.liga.net/technology/novosti/v-ukraine-tolko-2-postavschikov-ispolzuyut-internet-veschey>
12. Borislavskiy B., & Traknov N. Kak IoT, AI i Big Data vnedryayut i ispolzuyut v Ukraine: ekspertnoe mnenie predstaviteley Vodafone. Retrieved from: <https://aiconference.com.ua/ru/news/kak-iot-ai-i-big-data-vnedryayut-i-ispolzuyut-v-ukraine-ekspertnoe-mnenie-predstaviteley-vodafone-98651>
13. Komitet InAU z pytan Internetu rechei vyznachyv konkretni kroky z populyaryzatsii i rozvytku v Ukraini tsoho rynku. Retrieved from: <https://inau.ua/news/komitet-inau-z-pytan-internetu-rechey-vyznachyv-konkretni-kroky-z-populyaryzatsiyi-i-rozvytku-v>
14. Oliyarnyk, M. Medlenno i uverenno. Bolee desyatka gorodov Ukrainyi uzhe podklyuchilis k «internetu veschey». Retrieved from: <https://ubr.ua/market/telecom/medlenno-i-uverenno-bolee-desyatka-horodov-ukrainy-uzhe-podklyuchilis-k-internetu-veshchey-3890134>

15. Shah F. (2020). Microsoft, Amazon & Huawei Lead the Overall IoT Platform Landscape in Completeness; ClearBlade & FogHorn Emerge as Leading Edge-Focused IoT Platforms. Retrieved from: <https://www.counterpointresearch.com/microsoft-amazon-clearblade-foghorn-emerge-leading-edge-focused-iot-platforms/>
16. Zubchynskiy, V. V., Tereshchenko, I. K., & Shevchenko, Ye. O. (2019). Ohliad isnuichykh system dystantsiinoho kontroliu prystroiv IoT. *ZVIAZOK*. **4**, 56–59.
17. N.O.Sokolova, A.S.Bielov. Informatsiina systema monitorynhu mikroklimata robochoho mistia. *Visnyk KhNTU*. **2**(69), Part 2, 250–255.

Соколова Наталя Олегівна – старший викладач кафедри комп’ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, e-mail: n.olegowna@gmail.com ORCID: 0000-0002-2207-1884.

Белов Андрій Сергійович – бакалавр кафедри комп’ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, e-mail: fearess7@gmail.com.

УДК 514.12

Е.В. СТЕГАНЦЕВ
Запорожский национальный университет

КЛАССИФИКАЦИЯ КРИВЫХ ВТОРОГО ПОРЯДКА ПО ИХ ПРООБРАЗАМ ПРИ СТЕРЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ

Из аналитической геометрии известны аффинная и метрическая классификации кривых второго порядка. Тот или иной класс кривых характеризуется определенным набором инвариантов. В данной статье предлагается способ определения класса кривой второго порядка по ее прообразу в стереографической проекции. Само понятие стереографической проекции довольно часто используется в разных областях математики, а также в астрономии и географии. Известно, что образами окружностей при стереографической проекции всегда являются либо окружности, либо прямые линии. Целью данной статьи является получение критериев, которые позволят определить тип кривой второго порядка, если известен ее прообраз на сфере при стереографической проекции.

В статье получены формулы прямого и обратного стереографического отображения. Показано, что прообраз кривой второго порядка на сфере можно задать системой алгебраических уравнений. Одним из уравнений в этой системе является уравнение сферы, а левая часть второго уравнения - это однородный многочлен. Применены свойства стереографической проекции сферы на плоскость для формулирования и доказательства теоремы об особенностях расположения точек прообразов кривых второго порядка. Сформулирован критерий, который позволяет по известному прообразу невырожденной кривой второго порядка на сфере определить тип этой кривой. Аналогичный критерий сформулирован для вырожденных кривых второго порядка. При получении и доказательстве этих критериев существенно использовался тот факт, что коэффициенты в уравнении кривой второго порядка и коэффициенты в уравнении, задающем прообраз этой кривой, одинаковы. Поэтому тип образа можно определить, не переходя к его уравнению, а пользуясь только уравнением прообраза. Для этого нужно использовать инварианты кривых второго порядка. В статье приведены примеры, иллюстрирующие работу критериев.

Ключевые слова: кривая второго порядка; невырожденная кривая второго порядка; вырожденная кривая второго порядка; стереографическая проекция; образ; прообраз; инвариант; однородный многочлен; сфера; окружность; прямая; плоскость; центр проекции; координаты; система уравнений; окрестность точки; эллипс; гипербола; парабола; взаимнооднозначное отображение.

Е.В. СТЕГАНЦЕВ
Запорізький національний університет

КЛАСИФІКАЦІЯ КРИВИХ ДРУГОГО ПОРЯДКУ ЗА ЇХ ПРООБРАЗАМИ ПРИ СТЕРЕОГРАФІЧНІЙ ПРОЕКЦІЇ

Из аналитической геометрии известны аффинная и метрическая классификации кривых второго порядка. Той чи інший клас кривих характеризується певним набором інваріантів. В даній статті пропонується спосіб визначення класу кривої другого порядку за її прообразом в стереографічній проекції. Саме поняття стереографічної проекції доволі часто використовується в різних областях математики, а також в астрономії і географії. Відомо, що образами кіл при стереографічній проекції завжди є

або кола, або прями лінії. Метою даної статті є отримання критеріїв, які дозволять визначити тип кривої другого порядку, якщо відомий її прообраз на сфері при стереографічній проекції.

В статті отримані формули прямого та оберненого стереографічного відображення. Показано, що прообраз кривої другого порядку на сфері можна задати системою алгебраїчних рівнянь. Одним з рівнянь в цій системі є рівняння сфери, а ліва частина другого рівняння - це однорідний многочлен. Застосовано властивості стереографічної проекції сфери на площину для формулювання і доведення теореми про особливості розташування точок прообразів кривих другого порядку. Сформульовано критерій, який дозволяє за відомим прообразом невиродженої кривої другого порядку на сфері визначити тип цієї кривої. Аналогічний критерій сформульовано для вироджених кривих другого порядку. При отриманні і доведенні цих критеріїв істотно використовувався той факт, що коефіцієнти в рівнянні кривої другого порядку і коефіцієнти в рівнянні, що задає прообраз цієї кривої, однакові. Тому тип образу можна визначити, не переходячи до його рівняння, а використовуючи тільки рівняння прообразу. Для цього треба використовувати інваріанти кривих другого порядку. В статті наведені приклади, які ілюструють роботу критеріїв.

Ключові слова: крива другого порядку; невироджена крива другого порядку; вироджена крива другого порядку; стереографічна проекція; образ; прообраз; інваріант; однорідний многочлен; сфера; коло; пряма; площина; центр проекції; координати; система рівнянь; окіл точки; еліпс; гіпербола; парабола; взаємнооднозначне відображення.

E.V. STEGANTSEV
Zaporozhye national university

THE CLASSIFICATION OF THE CONICS ACCORDING TO THEIR INVERSE IMAGES IN THE STEREOGRAPHIC PROJECTION

An analytical geometry gives the affine and metrical classifications of the conics. Each class of the curves is characterized by the certain group of the invariants. This article deals with the technique which gives an opportunity to determine the class of the conic according to its inverse image in the stereographic projection. The concept of the stereographic projection is frequently used in the different branches of mathematics, and also in astronomy and geography. It is known that the images of the circumferences in the stereographic projection are always either circumferences or the straight lines. The aim of this article is the obtaining of the criteria, which an the opportunity to determine the type of the conic in the case when its inverse image in the stereographic projection is given.

The formulae for the direct and inverse stereographic mapping have been obtained in the article. It has been shown that the inverse image of the conic on the sphere can be specified with the help of the system of the algebraic equations. One of the equations in this system is the equation of the sphere, and the left-hand side of the other equation is the homogeneous polynomial. The properties of the stereographic projection have been used for the formulating and the proof of the theorem on the particularities of the location of the points of the inverse images of the conics. The criterion, which gives an opportunity to determine the type of the non-degenerate conic in the case when its inverse image on the sphere is given, has been obtained. The similar criterion for the degenerate conics has been formulated. The fact that the coefficients in the equation of the conic and the coefficients in the equation of its inverse image are the same has been used essentially in the formulating and in the proof of these criteria. Hence, in order to determine the type of the image it is not necessary to know

its equation. One can use only the equation of the inverse image. For these purpose, it is necessary to use the invariants of the conics. The examples, which show how the criteria work, have been given in the article.

Keywords: conic; non-degenerate conic; degenerate conic; stereographic projection; image; inverse image; invariant; homogeneous polynomial; sphere; circumference; straight line; plane; center of the projection; coordinates; system of the equations; neighborhood of the point; ellipse; hyperbola; parabola; one-to-one correspondence.

Постановка задачи

Рассмотрим сферу в трехмерном евклидовом пространстве. Зафиксируем одну из ее точек P . Построим плоскость σ , перпендикулярную диаметру, проходящему через точку P . Каждой точке M сферы (кроме точки P) поставим в соответствие точку N плоскости σ , являющуюся пересечением прямой PM с этой плоскостью. Такое центральное проектирование принято называть стереографической проекцией сферы на плоскость.

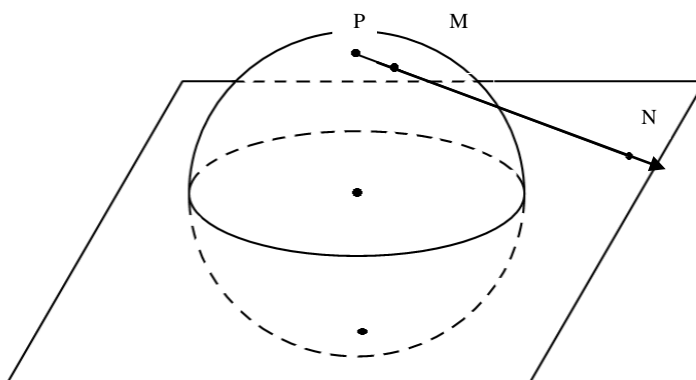


Рис. 1. Стереографическая проекция.

Выберем плоскость σ так, чтобы она проходила через центр сферы (рис. 1). Приведем одно из трех наиболее известных свойств стереографической проекции [4], которое будет использоваться в статье.

Свойство. Проекциями окружностей, которые лежат на сфере, и не проходят через центр проекции, являются окружности на плоскости σ . Если окружности на сфере проходят через центр проекции, то их проекциями являются прямые на плоскости σ .

Выберем декартову систему координат с центром в центре сферы, тогда плоскость σ имеет уравнение $Z = 0$. Любая окружность сферы (образ окружности на плоскости $Z = 0$) может быть задана системой уравнений

$$\begin{cases} F(X, Y, Z) = 0, \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где F – линейный многочлен от переменных X, Y, Z , то есть окружность является пересечением некоторой плоскости со сферой. Поскольку других плоских кривых (кроме окружностей) на сфере нет, то понятно, что прообразами кривых второго порядка, отличных от окружности, есть неплоские кривые. Любая сферическая кривая задается системой уравнений (1), где F – некоторая функция от переменных X, Y, Z . Возникает вопрос, какой вид должна иметь функция F для того, чтобы система

уравнений (1) задавала сферическую кривую, являющуюся прообразом отличной от окружности кривой второго порядка при стереографической проекции.

Стереографическая проекция является взаимнооднозначным отображением сферы с выколотой точкой на плоскость, проходящую, например, через центр сферы. Координаты X, Y, Z точки на сфере связаны с координатами x, y ее образа на плоскости $Z = 0$ формулами

$$x = \frac{X}{1-Z}, y = \frac{Y}{1-Z}, Z \neq 1. \quad (2)$$

Анализ последних исследований и публикаций

Определение и основные свойства стереографической проекции рассмотрены в работе [4]. Также в этой работе авторами рассмотрены некоторые ее применения. Несколько другой подход к стереографической проекции дан в книге [2]. В этой же работе описаны свойства сферической метрики, напрямую связанные с рассматриваемым видом проектирования. Определение типа невырожденной кривой второго порядка по ее прообразу при стереографической проекции рассмотрено в работе [8].

Цель исследования

Получить критерии распознавания типа кривой второго порядка на плоскости $Z = 0$ по ее прообразу на сфере.

Изложение основного материала исследования

1. Задание прообраза кривой второго порядка.

Для начала определим вид функции F в системе уравнений (1), задающей прообраз отличной от окружности кривой второго порядка при стереографической проекции. Может ли эта функция быть произвольным многочленом? Обратим внимание на следующую особенность этого многочлена. В силу биективности стереографической проекции можно найти формулы, обратные к формулам (2), то есть формулы для нахождения образа точки при стереографической проекции сферы на плоскость. Они имеют вид

$$X = \frac{2x}{x^2 + y^2 + 1}, Y = \frac{2y}{x^2 + y^2 + 1}, Z = \frac{x^2 + y^2 - 1}{x^2 + y^2 + 1}, \quad (3)$$

где X, Y, Z – координаты точки на сфере, а x, y – координаты ее образа на плоскости $Z = 0$. Из этих формул ясно, что многочлен $F(X, Y, Z)$ не может быть произвольным многочленом второй степени. Вывод о виде этого многочлена легко получается, если заметить, что последняя из формул (3) дает

$$1 - Z = \frac{2}{x^2 + y^2 + 1}.$$

Заметим также, что система уравнений

$$\begin{cases} F(X, Y, Z) = 0, Z \neq 1, \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1, \end{cases} \quad (4)$$

может иметь несколько равносильных видов, переход от одного из которых к другому осуществляется с помощью известных элементарных преобразований. Например, если

система (4) имеет вид $\begin{cases} X^2 + 8Y^2 + 2 + 2Z = 0, \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1, Z \neq 1, \end{cases}$ то можно перейти к равносильной ей

системе $\begin{cases} 2X^2 + 9Y^2 + (1 - Z)^2 = 0, \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1, Z \neq 1, \end{cases}$ заменив первое уравнение суммой первого и второго

уравнений. Проведенные рассуждения позволяют сформулировать следующий факт.

Теорема 1. Для того, чтобы система уравнений (4) задавала на сфере прообраз при стереографической проекции отличной от окружности кривой второго порядка, необходимо и достаточно, чтобы либо функция F была однородным многочленом второй степени относительно $X, Y, 1 - Z$, либо можно было с помощью элементарных преобразований перейти к системе уравнений, равносильной системе (4), для которой указанное свойство выполняется.

2. Особенности расположения точек прообразов невырожденных кривых.

Теорема 2. Если кривая на сфере является прообразом эллипса, то существует такая окрестность точки $P(0,0,1)$ на сфере, что в этой окрестности нет ни одной точки прообраза. Если кривая на сфере является прообразом гиперболы или параболы, то в любой окрестности точки $P(0,0,1)$ на сфере существуют точки прообраза.

Покажем, что в случае эллипса достаточно провести доказательство для эллипса с центром в начале координат и имеющего каноническое уравнение

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (5)$$

Действительно, пусть эллипс расположен на плоскости $Z = 0$ так, что выбранная система координат не является канонической. Тогда, «охватим» этот эллипс другим таким эллипсом, который относительно выбранной системы координат имеет каноническое уравнение. Пример одного такого «охвата» дает рис. 2.



Рис. 2. «Охват» эллипса.

Тот факт, что если теорема справедлива для эллипса, заданного уравнением (5), то она справедлива и для любого «охваченного» им эллипса, следует из простого, достаточно очевидного, свойства стереографической проекции: чем дальше точка на плоскости $Z = 0$ удаляется от центра сферы, тем ближе ее прообраз приближается к центру проектирования. Итак, докажем теорему для эллипса, заданного уравнением (5).

Первое уравнение системы (1), задающей прообраз этого эллипса, получаем после подстановки в уравнение (5) формул (2) и умножения на знаменатель $(1 - Z)^2$. Вторым уравнением будет уравнение сферы. Итак

$$\begin{cases} b^2 X^2 + a^2 Y^2 - a^2 b^2 (1 - Z)^2 = 0, Z \neq 1, \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1. \end{cases} \quad (6)$$

Пересечем сферу плоскостью $Z = 1 - \varepsilon$. Получим систему уравнений

$$\begin{cases} b^2 X^2 + a^2 Y^2 - a^2 b^2 (1 - Z)^2 = 0, \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1, Z \neq 1, \\ Z = 1 - \varepsilon, \varepsilon > 0. \end{cases} \quad (7)$$

Покажем, что эта система не имеет решений в некоторой окрестности точки $P(0,0,1)$. Действительно, после нахождения Y^2

$$Y^2 = \frac{b^2 \varepsilon^2 (a^2 + 1) - 2b^2 \varepsilon}{(a^2 - b^2)},$$

нужно рассмотреть два случая: $a^2 - b^2 > 0$ и $a^2 - b^2 < 0$. Первый из этих случаев дает $\varepsilon < \frac{2}{a^2 + 1}$. Таким образом, в ε -окрестности точки $P(0,0,1)$ при $\varepsilon \in \left(0; \frac{2}{a^2 + 1}\right)$ система

(7) не имеет решений, то есть в этой окрестности нет ни одной точки кривой (4).

Аналогично, во втором случае такая окрестность тоже найдется, а именно, при

$\varepsilon \in \left(0; \frac{a^2}{1 + b^2}\right)$ система уравнений (7) не имеет решений.

Пример кривой на сфере дает система уравнений

$$\begin{cases} X^2 + 8Y^2 - 4(1 - Z)^2 = 0, \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1, Z \neq 1. \end{cases} \quad (8)$$

При $\varepsilon \in \left(0; \frac{2}{5}\right)$ она не имеет решений. Таким образом, согласно теореме кривая,

определяемая системой (8), может быть прообразом эллипса.

Аналогичное доказательство проводится для гиперболы и параболы.

3. Классификация невырожденных кривых второго порядка по их прообразам при стереографической проекции.

Выясним, как по указанному прообразу определить вид невырожденной кривой второго порядка на плоскости $Z = 0$. Найдем образ на плоскости $Z = 0$ сферической кривой, заданной системой уравнений

$$\begin{cases} a_{11} X^2 + a_{22} Y^2 + a_{33} (1 - Z)^2 + 2a_{12} XY + 2a_{13} X(1 - Z) + 2a_{23} Y(1 - Z) = 0, \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1, \\ Z \neq 1. \end{cases} \quad (9)$$

Для этого подставим в первое уравнение системы (9) формулы (3). После элементарных преобразований получим уравнение

$$a_{11}x^2 + a_{22}y^2 + 2a_{12}xy + 2a_{13}x + 2a_{23}y + 1 = 0 \quad (10)$$

кривой второго порядка на плоскости $Z = 0$. Тип этой кривой (эллиптическая, параболическая, гиперболическая) определяется детерминантом $\delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$. Если же

кроме этого определитель $\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$ отличен от нуля, то кривая (10) будет

невырожденной. Но поскольку коэффициенты в уравнении (10) такие же, как и в первом уравнении системы (9), то тип образа мы можем определить, не переходя к его уравнению, а пользуясь только уравнением прообраза. То есть может быть сформулирована следующая

Теорема 3. Система уравнений (9) задает прообраз эллипса (параболы, гиперболы) тогда и только тогда, когда число $\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$ отлично от нуля, а

число $\delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$ положительно (равно нулю, отрицательно).

4. Классификация вырожденных кривых второго порядка по их прообразам при стереографической проекции.

Теорема 4. Система уравнений (9) задает прообраз вырожденной кривой эллиптического (параболического, гиперболического) типа тогда и только тогда, когда

число $\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}$ равно нулю, а число $\delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}$ положительно (равно нулю, отрицательно).

Следствие 1. Система уравнений (9) задает прообраз действительной точки, тогда и только тогда, когда число $\Delta = 0$, а число $\delta > 0$.

Следствие 2. Система уравнений (9) задает прообраз вырожденной параболы, тогда и только тогда, когда число $\Delta = 0$, а число $\delta = 0$.

Следствие 3. Система уравнений (9) задает прообраз вырожденной гиперболы (пара действительных пересекающихся прямых), тогда и только тогда, когда число $\Delta = 0$, а число $\delta < 0$.

Дополним следствие 3, добавив к критерию классификации сведения, касающиеся инварианта относительно поворота системы координат:

$$B = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{13} & a_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{23} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

Следствие 4. Система уравнений (9) задает прообраз пары действительных параллельных прямых (одной действительной прямой, получающейся при совпадении параллельных прямых, пары мнимых параллельных прямых, которые не содержат ни одной действительной точки), тогда и только тогда, когда число $\Delta = 0$, число $\delta < 0$, а число $B < 0$ ($B = 0$, $B > 0$).

Приведем примеры. Рассмотрим систему уравнений:

$$\begin{cases} 4X^2 + 3Y^2 + 36(1-Z)^2 + 24X(1-Z) = 0, \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1 \end{cases} \quad (11)$$

Найдем инварианты первого уравнения заданной кривой

$$\Delta = \begin{vmatrix} 4 & 0 & 12 \\ 0 & 3 & 0 \\ 12 & 0 & 36 \end{vmatrix} = 0.$$

Согласно теореме 4 система (11) задает прообраз вырожденной кривой второго порядка, поэтому это не будет ни эллипс, ни парабола, ни гипербола. Найдем δ , для определения типа вырожденной кривой:

$$\delta = \begin{vmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 3 \end{vmatrix} = 12 > 0,$$

Искомое $\delta > 0$, поэтому согласно следствию 1 система уравнений (11) задает прообраз вырожденной кривой эллиптического типа, а именно действительной точки.

Рассмотрим теперь другую систему уравнений:

$$\begin{cases} X^2 + Y^2 + Z^2 + 4XY + 2X(1-Z) + 4Y(1-Z) = 0, \\ X^2 + Y^2 + Z^2 = 1 \end{cases} \quad (12)$$

Найдем инварианты первого уравнения системы

$$\delta = \begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{vmatrix} = -3 < 0, \quad \Delta = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Согласно теореме 4 и следствию, система (12) задает прообраз вырожденной гиперболы (пары мнимых параллельных прямых).

Выводы

В работе получены критерии распознавания типа кривой второго порядка на плоскости $Z = 0$ по ее прообразу при стереографической проекции.

Список использованной литературы:

1. Дубровин Б. А., Новиков С. П., Фоменко А. Т. Современная геометрия. Методы и приложения. М.: Наука, 1986. 760 с.
2. Мищенко А. С., Фоменко А. Т. Курс дифференциальной геометрии и топологии. М.: Изд - во Моск. ун - та, 1980. 439 с.
3. Энциклопедия элементарной математики. Книга четвертая – геометрия. М.: Физматгиз, 1963. 568 с.

4. Розенфельд Б. А., Сергеева Н. Д. Стереографическая проекция. М.: Наука, 1973. 48 с.
5. Яглом И. М. Принцип относительности Галилея и неевклидова геометрия. М.: Наука, 1969. 304 с.
6. Кованцов Н. И., Зражевская Г. М., Кочаровский В. Г., Михайловский В. И. Дифференциальная геометрия, топология, тензорный анализ. Сборник задач. К.: Вища школа, 1989. 398 с.
7. Понарин Я. П. Неевклидовы геометрии с аффинной базой. Киров: Кировский государственный педагогический институт, 1991. 121 с.
8. Стеганцев Е. В. Распознавание типа кривой второго порядка по ее прообразу при стереографической проекции. *Вестник Херсонского национального технического университета*. 2013. Вып. 2(47). С. 319–322.

References

1. Dubrovin, B. A., Novikov, S. P., & Fomenko, A. T. (1986). *Sovremennaya geometriya. Metody i prilozheniya*. М.: Nauka.
2. Mischenko, A. S., & Fomenko, A. T. (1980). *Kurs differentsialnoy geometrii i topologii*. М.: Izd - vo Mosk. un–ta..
3. *Entsiklopediya elementarnoy matematiki (1963). Kniga chetvertaya – geometriya*. М.: Fizmatgiz.
4. Rozenfeld, B. A., & Sergeeva, N. D. (1973). *Stereograficheskaya proektsiya*. М.: Nauka.
5. Yaglom, I. M. (1969). *Printsip otноситelnosti Galileya i neevklidova geometriya*. М.: Nauka.
6. Kovantsov, N. I., Zrazhevskaya, G. M, Kocharovskiy, V. G., & Mihaylovskiy V. I. (1989). *Differentsialnaya geometriya, topologiya, tenzorniy analiz. Sbornik zadach*. К.: Vischa shkola.
7. Ponarin, Ya. P. (1991). *Neevklidovyi geometrii s affinnoy bazoy*. Киров: Кировский gosudarstvenniy pedagogicheskiy institut.
8. Stegantsev, E. V. (2013). *Raspoznvanie tipa krivoy vtorogo poryadka po ee proobrazu pri stereograficheskoy proektsii*. *Vestnik Hersonskogo natsionalnogo tehnicheskogo universiteta*. 2, 319–322.

Стеганцев Евгений Викторович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры общей математики Запорожского национального университета, e-mail: znu@znu.edu.ua

UDC (УДК) 51-7.+535.3

P. P. TROKHIMCHUCK

Lesya Ukrayinka Eastern European National University

MODELLING OF THE DIRECT LASER-INDUCED OPTICAL BREAKDOWN IN SOLID

The problem of modeling the laser-induced optical breakdown is represented as creation universal method for all media – from gases to solid. It is the first attempt of observation this problem in main details in whole. Level of complexity of this problem is shown. From physical-chemical point of point of view the optical breakdown is the regime of fool breakage of all chemical bonds in irradiated matter in zone of laser irradiation. In this case we can determine the threshold of breakdown of irradiated matters with help methods of Relaxed Optics. This regime may be received with help three ways. First is thermal. In this case the basic relaxation of first order processes of optical excitation are thermal. Examples of these process are regimes by continuous and millisecond laser irradiation of matter. Second is plasma. In this case the main role of the optical breakdown has process of formation “collective” electromagnetic (electron-ionic) process. The examples of this process are the irradiation in the millisecond or nanosecond regimes of irradiation. In this case laser-induced plasma radiated continuum optical spectra in all direction (star effect). Third is directing optical. In this case we have direct multiphotonic ionization and these processes have oriental nature. The second order irradiation has Cherenkov nature. The experimental data were received for nanosecond, picosecond and femtosecond regimes of irradiation. This differentiation is connected with various nature of relaxation of first-order optical excitations. The comparative analysis of three types modeling is represented. We show that third direct laser-induced breakdown is companioned by the nonlinear optical transformation of initial radiation (diffraction stratification, Cherenkov radiation and interference of its radiation). The chain of corresponding models for various media are represented and discussed. Thus we show that large value for the laser-induced optical breakdown has nonlinear optical processes and therefore this process has complex chain nature this fact must be included for the modeling these processes.

Key words: laser-induced optical breakdown, Relaxed Optics, modeling, chain processes, Cherenkov radiation

П.П. ТРОХИМЧУК

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

МОДЕЛЮВАННЯ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНОГО ОПТИЧНОГО ПРОБІЮ В ТВЕРДИХ ТІЛАХ

Задача моделювання лазерно-індукованого оптичного пробію представляється як створення універсального методу для всіх середовищ – від газів до твердого тіла. Це перша спроба детального дослідження цієї проблеми в цілому. Показаний рівень складності цієї проблеми. З фізико-хімічної точки зору оптичний пробій є режимом повного розриву всіх хімічних зв'язків в опромінюється речовині в області лазерного опромінення. У цьому випадку ми можемо визначити поріг руйнування опромінених речовин за допомогою методів релаксаційної оптики. Режим оптичного пробію можна отримати за допомогою трьох способів. Перший – тепловий. У цьому випадку основна релаксація первинних процесів оптичного збудження є теплова. Прикладами цього процесу можуть бути імпульсне мілісекундне та неперервне лазерне опромінення речовини. Другий – плазмовий. В цьому випадку основну роль в оптичному пробію має

формування «колективного» електромагнітного (електронно-іонного) процесу. Прикладами цього процесу є лазерне опромінення імпульсами мілісекундної або наносекундної тривалості. При цьому лазерно-індукована плазма випромінює неперервне випромінювання у всіх напрямках (ефект зірки). Третій – прямий оптичний. У цьому випадку ми маємо пряму багатофотонну іонізацію, і ці процеси носять орієнтаційний характер. Вторинне випромінювання (перевипромінювання) це черенковське випромінювання з оптичним збудженням. Цей факт підтверджений експериментальними даними для наносекундного, пікосекундного та фемтосекундного режимів опромінення. Це відмінність пов'язана з різною природою релаксації первинних оптичних збуджень. Представлено порівняльний аналіз моделювання цих трьох типів процесів. Показано, що третій процес, прямий лазерний пробій, супроводжується нелінійно-оптичними перетвореннями вихідного випромінювання (дифракційна стратифікація, черенковське випромінювання та інтерференція цього випромінювання). Представлено та обговорено ланцюжок відповідних моделей для різних середовищ. Таким чином, показано, що велике значення для лазерного оптичного пробоя мають нелінійно-оптичні процеси., Ці процеси мають складну ланцюгову природу і це необхідно враховувати при їх моделюванні.

Ключові слова: лазерно-індукований оптичний пробій, релаксаційна оптика, моделювання, ланцюгові процеси, черенковське випромінювання.

П.П. ТРОХИМЧУК

Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Задача моделирования лазерно-индуцированного оптического пробоя представляется как создание универсального метода для всех сред – от газов до твердого тела. Это первая попытка детального исследования этой проблемы в целом. Показан уровень сложности этой проблемы. С физико-химической точки зрения оптический пробой является режимом полного разрыва всех химических связей в облучаемом веществе в зоне лазерного облучения. В этом случае мы можем определить порог разрушения облученных веществ с помощью методов релаксационной оптики. Этот режим можно получить с помощью трех способов. Первый – тепловой. В этом случае основная релаксация первичных процессов оптического поглощения – тепловая. В качестве примеров таких процессов могут служить импульсное миллисекундное и непрерывное лазерное излучение. Второй – плазменный. В этом случае основную роль при оптическом пробое играет формирование «колективного» электромагнитного (электронно-ионного) процесса. Примеры этого процесса – лазерное облучение вещества импульсами миллисекундной или наносекундной длительности. В этом случае лазерно-индуцированная плазма излучает непрерывное излучение во всех направлениях (эффект звезды). Третий – прямой оптический. В этом случае мы имеем прямую многофотонную ионизацию и эти процессы имеют ориентационный характер. Вторичное излучение (переизлучение) это черенковское излучение с оптическим возбуждением. Подтверждающие экспериментальные данные получены для наносекундного, пикосекундного и фемтосекундного режимов облучения. Это различие для трех процессов связано с различной природой релаксации первичных оптических возбуждений. Представлен сравнительный анализ моделирования этих процессов. Показано, что третий процесс сопровождается нелінійно-оптичним преобразованием исходного излучения (дифракционная стратифікація, черенковское излучение и интерференция этого

излучения). Представлена и обсуждена цепочка соответствующих моделей для различных сред. Таким образом показано, что большое значение для лазерно-индуцированного оптического пробоя имеют нелинейно-оптические процессы, и, следовательно, этот процесс имеет сложную цепную природу. Поэтому это необходимо учитывать при моделировании таких процессов.

Ключевые слова: лазерно-оптический пробой, релаксационная оптика, моделирование, цепные процессы, черенковское излучение.

Problem Statement

Problems of the observation the laser-induced optical breakdown and shock processes in matter as Nonlinear (NLO) and Relaxed (RO) Optical processes are connected with acoustic (thermal) and electromagnetic (plasma and Nonlinear optical) nature [1–4]. These processes may be connected with diffractive stratification of laser beam, self-focusing, self-trapping, generation of supercontinuum radiation (ordered – Cherenkov radiation [3–4], and disorder – plasma radiation) [1–2].

We present this problem from one point of view for all media – from gases to solid [1–4]. Unfortunately the first attempt of observation this problem in main detail in whole are represented in [4] only.

Analysis of Recent Researches and Publications

According to [1–4], optical breakdown is understood as catastrophic damage caused by strong laser radiation. The cause of optical breakdown is avalanche ionization [1–2]. This process is differed from heat breakdown, which is result of laser-induced heat of irradiated matter, to directoptical multiphotonic ionization. Roughly speaking the optical breakdown is result of rapid introducing energy to matter with laser help. Optical breakdown determine a limit laser intensity of laser radiation, which irradiated matter can absorb.

In whole this problem [1–4] is very complex problem. From physical-chemical point of view the optical breakdown is the regime of fool breakage of all chemical bonds in irradiated matter in zone of laser irradiation [3–4]. In this case we can determine the threshold of breakdown of irradiated matters with help methods of RO (cascade model of excitation the proper chemical bonds in the regime of saturation the excitation) [3–4]. This regime may be received with help three ways. First is thermal. In this case the basic relaxation of first order processes of optical excitation are thermal [2–3]. As example of this process may be continuous laser irradiation of matter in self-absorption range of absorption spectrum. [3–4]. Second is plasma. In this case the main role of the optical breakdown has process of formation “collective” electromagnetic (electron-ionic) process [2–3]. The examples of this process are the irradiation in the millisecond or nanosecond regimes of irradiation [2–3]. In this case laser-induced plasma radiated continuum optical spectra in all direction (star effect) [2]. Third is direct optical [4]. In this case we have direct multiphotonic ionization and these processes have oriental nature [3–4]. The second order irradiation has Cherenkov nature [3–4]. The experimental data were received for nanosecond, picosecond and femtosecond regimes of irradiation [3–4]. This differentiation is connected with various nature of relaxation the first-order optical excitations. Thus we have three ways for the receiving of laser-induced breakdown.

Purpose of the Study

The comparative analysis of three types modeling is represented. We show that third direct laser-induced breakdown is companioned by the nonlinear optical transformation of initial radiation (diffraction stratification, Cherenkov radiation and interference of its

radiation). The chain of corresponding models for various media (solid, liquid and gas) are represented and discussed [3–4].

Thus we show that large value for the laser-induced optical breakdown has nonlinear optical processes and therefore this process has complex chain nature this fact must be included for the modeling these processes [3–4].

Description of Main Material of Research Experimental data

For modeling we select experimental data of complex laser-induced optical breakdown in hexagonal silicon carbide 4H-SiC after irradiation of femtosecond pulses with pulse duration 130 fs and wavelength 800 nm [5, 6] and in cubic crystals of potassium chloride after irradiation of nanosecond pulses of CO₂-laser with pulse duration 30 ns and wavelength 10,6 nm [7, 8].

Irradiation of silicon carbide crystals had next conditions [5, 6]. Light-penetration direction \vec{k} was perpendicular to electric field \vec{E} of light wave. Samples of 4H-SiC irradiated with help microscope. Focused radiation was incident on a periodic epoxy glue mask with period 20 μm [5], which applied to the sample.

Five stages of cascade destruction the irradiated silicon carbide were received [5]. Sectional area of receiving structures was $\sim 22 \mu\text{m}$ and the depth of $\sim 50 \mu\text{m}$. Samples of silicon carbide were irradiating with two values of energy: 200 nJ/pulse and 300 nJ/pulse [5, 6]. Optical micrograph of the mechanically thinned sample, which show cross sections of laser-irradiated lines (200 nJ/pulse), was representing. Bright-field TEM image of the cross section of a line written with pulse energy of 300 nJ/pulse was receiving [5]. These five stages disordered regions were located at a distance from 2 to 4 μm apart vertically [5]. Each stage have conic form. Slight misalignment of the tops of the cones observed [5]. Vertical breakdown regions with widths from 150 nm to 500 nm generated inside these cones [5]. In this case, there are lines in the irradiated nanocavity spherical and ellipsoidal forms with sizes from 10 nm to 20 nm. Bright-field TEM image of a portion of the cross section of a line was written with a pulse energy of 200 nJ/pulse too [6]. Schematic illustrations of the microstructure of a laser modified line and light-propagation direction (k), electric field (E), and scan direction (SD) are showing. Only two groups (groups I and II) of the laser-modified microstructure are selected and drawn [5, 6].

Sectional area of receiving structures was $\sim 22 \mu\text{m}$, the depth of $\sim 50 \mu\text{m}$. As seen from Fig. 1 (c) we have five stages disordered regions, which are located at a distance from 2 to 4 μm apart vertically [5, 6]. Branches themselves in this case have a thickness from 150 to 300 nm. In this case there are lines in the irradiated nanocavity spherical diameter of from 10 nm to 20 nm. In this case irradiated structures have crystallographic symmetry of the initial structure.

In this case diffraction processes may be generated in two stages: 1 – formation of diffraction rings of focused beams [3, 4] and second – formation of diffracting gratings in the time of redistribution of second-order Cherenkov radiation [3, 4]. Second case is analogous to the creation of self-diffraction gratings in NLO, but for Fig. 1 (c) and Fig. 1 (g) our gratings are limited by Much cone of Cherenkov radiation. Roughly speaking only Fig 1 (e) – (g) are represented “clean” breakdown.

Two damages region in a crystal with moderately high density of inclusions were received in [7] for crystals *KCl* after irradiation by CO₂-lase pulses (wavelength 10,6 μm , duration of pulse 30 ns). The laser was known to be operating in the lowest-order transverse Gaussian mode. There were several longitudinal modes, however, which contributed a time structure to the pulse, periodic at the cavity round-trip time. The phase relationships between the longitudinal modes varied from shot to shot, changing the details of the time structure and

causing the peak of the envelope to fluctuate by $\pm 15\%$ [7]. Energy of irradiation had value 2 J/pulse [8].

Successive laser shot (1/sec) was focusing into bulk single crystals using a 1-inch focal length “Irtran 2” lens [7].

According to [7] these results show that spatial laser-induced heterogeneities are result of influence inclusions. The damage bubbles occur randomly near, not necessarily in, the tiny focal volume. At a well-defined power threshold, an elongated pointed bubble forms, its vertex falling at the focus [Fig. 2(b)]. This power level is regarded as the bulk intrinsic breakdown threshold. Its value is reproducible in crystals from different manufacturers, with inclusions or without. When no inclusion-free samples of a compound were available, the considerations mentioned above were using to determine the dielectric strength [7].

Modeling and discussions

The first laser-induced filaments were received in the liquid [1, 3]. Later researches shown that analogous phenomena are characterized the solid and gas too [1, 3, 4]. Strongly speaking, these filaments are sparks of optical breakdown.

More universal concept is physical-chemical [3, 4]. According to this concept the critical value of power P_{cr} for the self-focusing may be determined in next way. Volume density of energy of the creation self-focusing process may be determined with help next formula W_{cvol} [1, 3, 4]

$$W_{cvol} = E_a N_{nc}, \quad (1)$$

where E_a – energy of activation corresponding “nonlinear” centers; N_{nc} – their concentration.

Surface density for optical thin may be determined as [3, 4]

$$W_{csur} = W_{cvol} / \alpha, \quad (2)$$

where α – absorbance index. Integral value of energy may be determined as [3–4]

$$W_{crin} = W_{csur} \cdot S, \quad (3)$$

where S – the square of irradiation.

In this case [3–4]

$$P_{cr} = W_{crin} / \tau_{ir}, \quad (4)$$

where τ_{ir} is duration of laser irradiation.

The determination the concentration of scattering centers must be determined with conditions of corresponding experiment. It is determined by the conditions of observation the proper phenomena.

Next step of determination the density of energy in our cascade is condition of diffractive stratification. This condition may be determined with help of sizes the diffractive rings. We can estimate density of energy in plane of creation the diffractive stratification for $n=5$.

Conic part of filament radiation has continuum spectrum: from ultraviolet to infrared. At first this effect was called superbroadening. Therefore it may be interpreted as laser-induced Cherenkov radiation [3, 4]. The angle 2θ in the vertex of an angle [3-5]. is double Cherenkov angle. In this case we have frozen picture of laser-induced destruction of 4H-SiC with help Cherenkov radiation [3, 4].

For the modeling of the Cherenkov radiation we used two models: Golub macroscopic model and modified Niels and Aage Bohrs microscopic model [3, 4].

First, macroscopic may be represented according by Golub [3, 4]. The similarity between charge particle and light-induced Cherenkov radiation one can invoke the analogy between Snell's law and Cherenkov radiation [3, 4]. This natural since both effects can be derived in the same way from the Huygens interference principle. In [3, 4] the point of intersection of a light pulse impinging at an angle φ on a boundary between two media moves with velocity $V = C/n_1 \cos \varphi$. As Golub shown that this relation, which can be obtained from Snell's law, gives the Cherenkov relation [3-4].

$$\cos \theta = C/n_2(\omega)V, \quad (5)$$

where $n_2(\omega)$ – the nonlinear refraction rate [3-4].

This formula allows explain the angle differences for various type of Cherenkov radiation. In this case V may be represented as velocity of generation the optical-induced polarization too [3, 4].

The microscopic mechanism of laser-induced Cherenkov radiation is expansion and application of Niels and Aage Bohrs microscopic theory of Cherenkov radiation as part of deceleration radiation on optical case [3, 4]. For optical case the Bohrs hyperboloid must be changed on Gaussian distribution of light for mode TEM₀₀ or distribution for focused light of laser beam [3, 4]. In this case Cherenkov angle may be determined from next formula

$$\theta_{Ch} + \alpha_{ir} = \pi/2 \text{ or } \theta_{Ch} = \pi/2 - \alpha_{ir}, \quad (6)$$

where α_{ir} – angle between tangent line and direction of laser beam.

Angle α_{ir} was determined from next formula [3-4]

$$\tan \alpha_{ir} = d_b/l_{sf}, \quad (7)$$

where d_b – diameter of laser beam, (7 mm), l_{sf} – length of focusing or self-focusing. In our case α_{ir} is angle of focusing or self-focusing.

This formula is approximate for average angle α_{ir} .

The Golub formula (5) was used for the determination product $n_2(\omega)V_{nl_pol}$ [3, 4]. Self-focusing and Cherenkov angles and product $n_2(\omega)V$ were estimated for LiF, CaF₂, fused silica, water and glass BK-7 in [4]. Thereby microscopic modified Bohrs theory and macroscopic Golub model are mutually complementary methods [3, 4].

The decreasing of Cherenkov angle and product $n_2(\omega)V$ for increasing of laser radiation intensity are corresponded to increasing of nonlinear refractive index and decreasing the speed of polarization (multiphotonic and multiwave processes) [3, 4].

In whole, microscopic mechanism of laser-induced Cherenkov radiation may be represented as nonequilibrium spectrum of all possible Nonlinear Optical phenomena in the local points of propagation the laser beam [3, 4].

The estimation of sizes the cascade of volume destructions in [5] was explained with help modified models of Rayleigh rings [3, 4].

The distance between diffraction spots and proper moving foci was determined with help next formula [3–4]:

$$l_{nf} = \frac{d_{ndif}}{2 \tan \varphi / 2}. \quad (8)$$

Qualitative explanation of development of cascade the destructions was next. The focus of each diffraction zone (spot) is the founder proper shock optical breakdown. But foci with more high number are placed in the “zone” of influence of previous foci. Therefore only first stage from fives [5] is represented pure shock mechanism (Mach cone). Mach cones are characterized the second and third stages from five [5]. But its maximums are displaced from center. It may be result if interaction second and third shock waves with previous shock waves: first – for second wave and first and second for third waves. The chock mechanism of destruction certifies a linear direction of optical breakdown. This direction is parallel to direction of shock wave and radiated spectrum is continuum as for Cherenkov radiation and as for observed laser-induced filaments in water and air [3, 4]. Thus, basic creator of optical breakdown traces is secondary Cherenkov radiation and shock waves. This radiation is absorbed more effectively as laser radiation and therefore the creation of optical breakdown traces is more effectively as for initial laser radiation. Cherenkov radiation is laid in self-absorption range of 4H-SiC, but 800 nm radiation – in intrinsic range [3, 4]. For the testing of this hypothesis, we must measure the spectrum of secondary radiation. In this case, we can use physical-chemical cascade model of excitation the proper chemical bonds of irradiated matter in the regime of saturation the excitation.

The conclusion about diffractive stratification of focused radiation may be certified by experimental data, which are represented in [5 – 7].

We can rough estimate basic peculiarities of energy distribution in Mach cone in five stages of laser-induced destruction of cascade through next formula [3, 4]

$$E_{lob} = \frac{\pi^2}{4} \left(\sum_{i=1}^5 n_{iav}^2 l_{iav} \right) r^2 N_{aSiC} E_{Zth}, \quad (9)$$

where n_{iav} – average visible number of filaments in proper group of cascade, $l_{iav}=1000 \text{ nm}$ – average length of filaments in proper group of cascade, $r = 10 \text{ nm}$ – average radius of filament, N_a – atom density of 4H-SiC, $N_{aSiC} = 9,4 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ – the atomic density of 4H-SiC.

For further estimation we use next approximation $n_{1av} = n_{2av} = n_{3av} = n_{4av} = n_{5av} = 100$, [3, 4].

Energy, which is necessary for the optical breakdown our nanotubes may be determined in next way. Zeitz threshold energy for 4H-SiC is equaled $E_{Zth} \sim 25 \text{ eV}$ [3, 4]. Let

this value is corresponded to energy of optical breakdown. Therefore, summary energy E_{lob} is equaled

$$E_{lob} = N_{asnt} \cdot E_{Zth} = 23,2 \text{ nJ}. \quad (10)$$

This value is equaled of $\sim 8\%$ from pulse energy or $\sim 30\%$ from the effective absorbed energy of pulse. In this case we have more high efficiency of transformation initial radiation to «irreversible» part of Cherenkov radiation. It is result of more intensive excitation comparatively with classical methods of receiving the Cherenkov radiation. In this case we have pure photochemical processes. The experimental data for intrinsic absorption (Fig. 5) show that for short pulse regime of irradiation (femtosecond regime) basic processes of destruction the fused silica and calcium fluoride are photochemical (multiphoton absorption in the regime of saturation the excitation). But basic peculiarity of experimental data Fig. 5 is transformation the initial laser radiation (wavelength 800 nm) to continuum Cherenkov radiation. From length of optical breakdown in 4H-SiC we can determine average absorption index of Cherenkov radiation. It is $\sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$. This value is corresponded to violet-blue range of absorption spectrum of 4H-SiC [3, 4].

Correlation between energy of optical breakdown and threshold energy of self-focusing for 4H-SiC is equaled 78333 and 117500 [3, 4].

Concept of diffractive stratification allows explaining the surface character of Cherenkov radiation. This radiation is generated in the region of corresponding focused diffractive ring [3, 4].

For the estimations the sizes and forms of nanovoid we used modified Rayleigh model [3–4]. Maximal radius of nanovoids is determined as

$$R_{\max} = \frac{2R}{0,915r} \sqrt{\frac{E_{ir}}{\pi\tau_i c E}}, \quad (11)$$

where T_c – the time of creation the nanovoid (bubble), R is radius of nanovoid, r – radius of irradiated zone, E – Young module, E_{ir} – energy of one pulse. τ_i – duration of pulse, c – speed of light [3–4].

If we substitute $r = 250 \text{ nm}$, $R = 10 \text{ nm}$, $E=600 \text{ GPa}$ [3–4], $E_{ir}=130 \text{ nJ}$, $\tau_i = 130 \text{ ps}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, than have $R_{\max}=11 \text{ nm}$. Experimental values for 4H-SiC $8 - 10 \text{ nm}$ [3–4].

Form of nanovoids was determined as ratio α between longitudinal \mathcal{G}_s and transversal \mathcal{G}_t speed of sound [3–4]

$$\alpha = \frac{\mathcal{G}_t}{\mathcal{G}_s} = \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}}. \quad (12)$$

Where ν – Poisson's ratio [4].

But this ratio must be true for shock waves too. Therefore for silicon carbide for $\nu = 0,45$ [3, 4] $\alpha = 0,33$. Roughly speaking last ratio is determined the step of ellipsoidal forms of our nanovoids [6].

In [3–4] we are estimated maximal longitudinal and transversal $R_{\max i}, i \in (l, t)$. These values are 6 nm and 19 nm properly.

In this case we represented 4H-SiC as isotropic plastic body. For real picture we must represent hexagonal structure. But for the qualitative explanation of experimental data of [5, 6] this modified Rayleigh model allow explaining and estimating the sizes and forms of receiving nanovoids [3–4].

Now we used physical-chemical method of estimation for the modeling experimental data for KCl [7]. Density of atoms of KCl is equaled $3,1 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. Zeits energy for KCl has value $\sim 30 \text{ eV}$ [3].

Results of this modeling are represented in Table 1.

Table 1

Basic characteristics for laser-induced optical breakdown for KCl [7]

Figure	$d_{average}, \mu\text{m}$	l, mm	$V_{ob}, 10^{-7} \text{ cm}^{-7}$	$N_{ob}, 10^{15}$	$E_{KCl ob}, 10^{-2} \text{ J}$
Fig. 2(a)	0,5	2	1,57	4,87	2,32
Fig. 2(b)	0,5	3	2,36	7,31	3,48

We used next approximations. Photography, which used in [7], gives a blurry image compared to the bright-field TEM image, which are used in [5, 6]. Therefore, we can't see the microstructure of optical breakdown for KCl. In this case we use rough average approximations for diameter $d_{average}$ and length l of cascade laser-induced optical breakdown for results [7]. Volume of cascade may be determined as cylinder volume.

Experimental data of [7] are similar to experimental data of [5, 6]. But regimes of irradiation of [7] are similar to mode TEM₀₁. Therefore, we have two channels of generation the cascade of laser-induced optical breakdown.

The distances between neighboring bubbles of [7] are more as between regions of destruction in [5]. But conditions of focusing the radiation in these both cases are equivalence. Therefore, the distances between neighboring bubbles l_2 ([7]) and neighboring regions of destruction l_1 ([5]) are connected by next formula, which is received with help formula (8)

$$l_2 = \frac{d_{ndif2} \tan\left(\frac{\varphi_1}{2}\right)}{d_{ndif2} \tan\left(\frac{\varphi_2}{2}\right)} l_1 = \frac{\lambda_2 \tan\left(\frac{\varphi_1}{2}\right)}{\lambda_2 \tan\left(\frac{\varphi_2}{2}\right)} l_1. \tag{13}$$

In whole, the correlation of these distances is depended from wavelength of irradiation and focusing angles, including intensity of irradiation? Which is determined the step of homogeneity of irradiated matter. If we substitute in formula (13) $\lambda_2 = 10,6 \mu\text{m}$ and $\lambda_1 = 0,8 \mu\text{m}$ and $\varphi_1 = \varphi_2$ then we'll receive

$$l_2 = 13,25 l_1. \tag{14 a}$$

Energy characteristics of irradiation weren't represented in [7] but were reference on [8]. Therefore, we select value 2 J/pulse from [8]. In this case we have effective using energy. Methods of estimations of energy characteristics of Table 1 are rougher as for 4H-SiC. But we must suppose that focused laser irradiation has diffraction stratification, generation of Cherenkov radiation and interference of this Cherenkov radiation. On second regime of irradiation in [7] we see 5-7 steps of cascade optical breakdown. Sources of Cherenkov radiation are diffraction-stratified cones.

If this scenario is true, we have as for 4H-SiC effective transformation the energy of laser radiation to cascade of laser-induced breakdown for *KCl* too. This value is 11,6 – 17,4 percents.

Experimental data, which are represented in [5, 6] and [7], are similar to bead lightning [3] and resembles a frozen picture in a travelling wave lamp. But for the formation these processes we must have two electrodes and modulated external field. For the case of laser-induced breakdown, we have only laser field, its nonlinear transformation, including diffractive stratification of laser beam, a generation of Cherenkov radiation and its interference, and multiphotonic absorption. In this case, we have internal nonlinear and relaxed optical processes.

As we see basic mechanism the heterogeneities cascade damages of laser-induced optical breakdown is nonlinear optical transformation of initial radiation. Inclusions in 4H-SiC and *KCl* are distributed homogenously and therefore one can't be the source of laser-induced heterogeneities. Potassium chloride crystals are obtained from an aqueous solution, and this method allows you to obtain the most pure crystals in comparison with other methods (Kyropoulos, Bridgman-Stockbarger, zone melting, etc.).

Conclusions

1. Comparative analysis of basic three types models of laser-induced optical breakdown in matter is representing.
2. Basic peculiarities of modeling the direct laser-induced optical breakdown are discussing.
3. The experimental data of laser-induced breakdown in 4H-SiC and *KCl* are analyzed.
4. Complex cascade model for explanation the direct laser-induced optical breakdown is representing.
5. The influences of diffraction stratification, Cherenkov radiation and interference of its Cherenkov radiation on laser-induced optical breakdown are showing.
6. Basic cause of receiving laser-induced heterogeneities is nonlinear and relaxed optical transformations of laser radiation.

References

1. Shen Y. R. Principles of Nonlinear Optics. New-York: Wiley Interscience, 2002. 563 p.
2. Veyko V. P., Libenson M. N., Chervyakov G. G., Yakovlev E. B. Interaction laser irradiation and matter. Force optics. Moscow: Phyzmatlit, 2008. 312 p. (In Russian)
3. Trokhimchuck P. P. Relaxed Optics: Modeling and Discussions. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2020. 249 p.
4. Trokhimchuck P. P. Some Problems of the Modeling the Optical Breakdown and Shock Processes in Nonlinear and Relaxed Optics. *IJARPS*. 2020. Vol. 7. Issue. 5. P. 17–30.
5. Okada T., Tomita T., Matsuo S., Hashimoto S., Ishida Y., Kiyama S., Takahashi T. Formation of Periodic Strain Layers Associated with Nanovoids Inside a Silicon Carbide Single Crystal Induced by Femtosecond Laser Irradiation. *J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 106 (054307). 5 p.
6. Okada T., Tomita T., Matsuo S., Hashimoto S., Kashino R., Ito T. Formation of Nanovoids in Femtosecond Laser Irradiated Single Crystal Silicon Carbide. *Material Science Forum*. 2012. Vol. 725. P. 19–22.
7. Yablunovich E. Optical Dielectric Strength of AlkaliHalide Crystals Obtained by Laserinduced Breakdown. *Appl. Phys. Lett.* 1971. Vol. 19. Issue. 11. P. 495–497.
8. Beaulieu A. J. Transversally Excited Atmospheric Pressure CO₂ Lasers. *Appl. Phys. Lett.* 1970. Vol. 16. Issue. 12. P. 504–505.

References

1. Shen, Y. R. (2002). Principles of Nonlinear Optics. New-York: Wiley Interscience.
2. Veyko, V. P., Libenson, M. N., Chervyakov, G. G., & Yakovlev, E. B. (2008). Interaction laser irradiation and matter. Force optics. Moscow: Phyzmatlit. (In Russian)
3. Trokhimchuck, P. P. (2020). Relaxed Optics: Modeling and Discussions. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing.
4. Trokhimchuck, P. P. (2020). Some Problems of the Modeling the Optical Breakdown and Shock Processes in Nonlinear and Relaxed Optics. *IJARPS*. **7**, 5, 17–30.
5. Okada, T., Tomita, T., Matsuo, S., Hashimoto, S., Ishida, Y., Kiyama, S., & Takahashi, T. (2009). Formation of Periodic Strain Layers Associated with Nanovoids Inside a Silicon Carbide Single Crystal Induced by Femtosecond Laser Irradiation. *J. Appl. Phys.* **106** (054307). 5 p.
6. Okada, T., Tomita, T., Matsuo, S., Hashimoto, S., Kashino, R., & Ito, T. (2012). Formation of Nanovoids in Femtosecond Laser Irradiated Single Crystal Silicon Carbide. *Material Science Forum*. **725**, 19–22.
7. Yablonovich, E. (1971). Optical Dielectric Strength of AlkaliHalide Crystals Obtained by Laserinduced Breakdown. *Appl. Phys. Lett.* **19**, 11, 495–497.
8. Beaulieu, A. J. (1970). Transversally Excited Atmospheric Pressure CO₂ Lasers. *Appl. Phys. Lett.* **16**, 12, 504–505.

Трохимчук Петро Павлович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри теоретичної та математичної фізики імені А. В. Свідзинського Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки e-mail: trope1650@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2737-0506.

УДК [519.711+536:621.923]

А.В. УСОВ, Ю.Е. СИКИРАШ

Одесский национальный политехнический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматриваются термомеханические процессы, сопровождающие обработку изделий из структурно неоднородных материалов. Наличие в поверхностном слое обрабатываемых изделий концентраторов напряжений в виде различного рода неоднородностей наследственного происхождения, привнесенных в процессе получения заготовки и последующих видов механической обработки являются основными показателями несущей способности рабочих поверхностей. Отсутствие исследований влияния неоднородностей, сформированных в поверхностном слое изделий в процессе механической обработки, на их функциональные свойства и, в частности, на несущую способность или износостойкость, определяет актуальность построения математической модели дефектообразования при физико-технической обработке элементов конструкций с использованием критериев механики разрушения. Разработана численно-аналитическая модель для определения термомеханического состояния структурно неоднородных материалов, которые содержат неоднородности типа межфазных трещин, включений при механической обработке. На основании этой модели определены функциональные связи критерия трещиностойкости с управляющими технологическими параметрами для обеспечения качественных характеристик обрабатываемых поверхностей изделий. Разработанная модель позволяет учитывать влияние неоднородностей технологического происхождения (начиная с заготовки и заканчивая готовым изделием), которые возникают в поверхностном слое во время изготовления элементов конструкций, на его разрушение.

Решение сингулярного интегрального уравнения с ядром Коши позволяет определить интенсивность напряжений в окрестности вершин структурных дефектов, которые формируются в поверхностном слое изделий при их механической обработке, и, сравнивая ее с критерием трещиностойкости для материала конструктивного элемента, можно определить состояние поверхностного слоя. В случае нарушения этого критерия дефект развивается в магистральную трещину. Моделирование термомеханических процессов при механической обработке элементов конструкций позволяет получить критериальное соотношение условия уравновешенного состояния дефектов, которые возникают в поверхностном слое изделий в зависимости от технологических параметров.

Ключевые слова: моделирование, структурно неоднородные материалы, механическая обработка, термомеханические процессы, дефектообразование, критерий.

А.В. УСОВ, Ю.Є. СІКІРАШ

Одеський національний політехнічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ ВИРОБІВ ІЗ СТРУКТУРНО НЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглядаються термомеханічні явища, що супроводжують обробку виробів із структурно неоднорідних матеріалів. Наявність у поверхневому шарі оброблюваних

виробів концентраторів напружень у вигляді різного роду неоднорідностей спадкового походження, привнесених у процесі отримання заготовки і наступних видів механічної обробки є основними показниками несучої здатності робочих поверхонь. Відсутність досліджень впливу неоднорідностей, сформованих в поверхневому шарі виробів у процесі механічної обробки, на їхні функціональні властивості та, зокрема, на несучу здатність або зносостійкість, визначає актуальність побудови математичної моделі дефектоутворення при фізико-технічній обробці елементів конструкцій з використанням критеріїв механіки руйнування. Розроблено чисельно-аналітичну модель для визначення термомеханічного стану структурно неоднорідних матеріалів, які містять неоднорідності типу міжфазних тріщин, включень при механічній обробці. На основі цієї моделі визначено функціональні зв'язки критерію тріщиностійкості з керуючими технологічними параметрами для забезпечення якісних характеристик оброблюваних поверхонь виробів. Розроблена модель дозволяє враховувати вплив неоднорідностей технологічного походження (починаючи із заготовки і закінчуючи готовим виробом), які виникають у поверхневому шарі під час виготовлення елементів конструкцій, на його руйнування.

Розв'язок сингулярного інтегрального рівняння з ядром Коші дозволяє визначити інтенсивність напружень в околі вершин структурних дефектів, що формуються у поверхневому шарі виробів при їх механічній обробці, і, порівнюючи її з критерієм тріщиностійкості для матеріалу конструктивного елемента, можна визначити стан поверхневого шару. У разі порушення цього критерію дефект розвивається у магістральну тріщину.

Моделювання термомеханічних процесів при механічній обробці елементів конструкцій дозволяє одержати критеріальне співвідношення умови зрівноваженого стану дефектів, що виникають у поверхневому шарі виробів залежно від технологічних параметрів.

Ключові слова: моделювання, структурно неоднорідні матеріали, механічна обробка, термомеханічні процеси, дефектоутворення, критерій.

A.V. USOV, Yu.Ye. SIKIRASH
Odessa National Polytechnic University

MODELING OF THERMOPHYSICAL PROCESSES AT THE MECHANICAL PROCESSING OF PRODUCTS FROM STRUCTURALLY INHOMOGENEOUS MATERIALS

Thermomechanical processes accompanying the processing of products from structurally inhomogeneous materials are considered. The presence in the surface layer of processed products of stress concentrators in the form of various kinds of inhomogeneities of hereditary origin introduced during process receipt of workpiece and subsequent types of mechanical processing are the main indicators of the bearing capacity. The lack of studies on the influence of inhomogeneities formed in the surface layer of products during process of the mechanical processing on their functional properties and, in particular, on the bearing capacity or wear resistance determines the relevance of constructing a mathematical model of defect formation during physicotchnical processing of structural elements using the criteria of fracture mechanics. A numerical-analytical model has been developed to determine the thermomechanical state of structurally inhomogeneous materials that contain inhomogeneities such as interfacial cracks and inclusions during machining. Based on this model, the functional relationships of the crack resistance criterion with controlling technological parameters are determined to ensure the qualitative characteristics of the

processed surfaces of the products. The developed model makes it possible to take into account the influence of inhomogeneities of technological origin (from the workpiece to the finished product) that occur in the surface layer during the manufacture of structural elements on its destruction.

The solution of the singular integral equation with the Cauchy kernel allows one to determine the stress intensity in the vicinity of the vertices of structural defects that form in the surface layer of products during their mechanical processing, and by comparing it with the crack resistance criterion for the material of a structural element, one can determine the state of the surface layer. In case of violation of this criterion, the defect develops into a main crack. Modeling of thermomechanical processes during the mechanical treatment of structural elements allows us to obtain a criteria ratio for the condition of the balanced state of defects that arise in the surface layer of products depending on technological parameters.

Keywords: modeling, structurally inhomogeneous materials, mechanical processing, thermomechanical processes, defect formation, criterion.

Постановка проблемы

Качество поверхностного слоя элементов конструкций при их изготовлении формируется под действием термомеханических явлений, сопровождающих механическую обработку [1–2]. Наличие в нем концентраторов напряжений в виде различного рода неоднородностей наследственного происхождения, привнесенных в процессе получения заготовки и последующих видов механической обработки являются основными показателями несущей способности рабочих поверхностей. Формирование дефектов технологического происхождения происходит из-за теплонапряженности при обработке элементов конструкций [3]. На основании моделей температурных полей, полей напряжений и механики разрушения изучаются закономерности образования дефектов типа структурных изменений, микротрещин и технологические возможности их устранения в зависимости от теплофизических свойств обрабатываемых материалов, режимов обработки, конструкции и характеристик применяемых инструментов [3–4]. Задачу о концентрации напряжения у дефектов решают с помощью механики материалов, которая при расчетах на несущую способность элементов конструкций учитывает микронеоднородности и дефектность их материалов. Учет дефектности, позволяет более адекватно представить механизм потери функциональных свойств изделий при их механической обработке.

Анализ последних исследований и публикаций

Имеющиеся в настоящее время модели термомеханических процессов обработки получены в предположении однородности материалов элементов конструкций и не учитывают наличие дефектов технологической наследственности изделий [5]. Имеются исследования влияния структурных превращений в сталях при их механической обработке на образование трещин, согласно которым наличие большого количества аустенита в подповерхностном слое деталей приводит к образованию растягивающих напряжений, которые реализуются в виде хрупких трещин [6–7]. Структурные превращения не могут быть «самостоятельной» причиной возникновения трещин, так как структурные напряжения, достигающие разрушающих значений, формируются на протяжении значительного промежутка времени. В некоторых случаях физико-техническая обработка элементов конструкций характеризуется кратковременностью, большими скоростями нагрева и охлаждения, при которых структурные изменения незначительны, а термомеханические напряжения достигают предельных значений [8]. Разработаны модели напряженно-деформированного состояния деталей с покрытиями, которые учитывают кусочную неоднородность изделий с покрытием [9–10]. Однако

отсутствие исследований влияния неоднородностей, сформированных в поверхностном слое изделий в процессе механической обработки на их функциональные свойства и, в частности, на несущую способность или износостойкость определяет актуальность построения математической модели дефектообразования при физико-технической обработке элементов конструкций с использованием критериев механики разрушения. Результаты моделирования позволяют эффективно оценить влияние структурных неоднородностей, сформированных при механической обработке в рабочих поверхностях изделий на потерю требуемых свойств.

Цель исследования

Разработать численно-аналитическую модель для определения термомеханического состояния структурно неоднородных материалов, которые содержат неоднородности типа межфазных трещин, включений при механической обработке. На основании этой модели определить функциональные связи критерия трещиностойкости с управляющими технологическими параметрами для обеспечения качественных характеристик обрабатываемых поверхностей изделий.

Изложение основного материала исследования

Разработка математических моделей, описывающих термомеханические процессы в поверхностном слое элементов конструкций при их изготовлении из материалов и сплавов с учетом их неоднородностей, влияющих на формирование дефектов типа трещин, позволяет определить критерии их равновесного состояния при эксплуатации таких элементов с учетом выполнения ими функционального назначения.

При выборе и обосновании математической модели учитывается, что процесс изготовления деталей сопровождается как тепловыми, так и механическими явлениями. Однако превалирующее воздействие на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя оказывают температурные поля. Учитывая то, что основная масса поверхностного слоя металла при физико-технической обработке находится в упругом состоянии, можно воспользоваться моделью термоупругого тела, отражающей взаимосвязь механических и тепловых явлений при конечных значениях тепловых потоков. Для исследований термомеханического состояния рабочих поверхностей элементов конструкций важной является информация о распространении температур и напряжений по глубине материала с учетом имеющихся в нем неоднородностей.

Для дальнейших исследований кинетики формирования термомеханических процессов в обрабатываемом материале в качестве основной теоретической предпосылки воспользуемся следующей системой дифференциальных уравнений [11–12], описывающей взаимодействие поля деформаций и поля температуры:

$$G\Delta\bar{U}_j + (\lambda_i + G) \text{grad div}\bar{U}_j - \rho \frac{\partial^2 \bar{U}_j}{\partial \tau^2} + P_j = \alpha_i \beta_i \text{grad}T, \quad (1)$$

$$\Delta T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} - \eta l \frac{\partial}{\partial \tau} \text{div}\bar{U}_j = -\frac{W}{\lambda} + C_q^{-2} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где λ_i, G – постоянные Ламе; $\beta_i = 3\lambda_i + 2G$; ρ – плотность обрабатываемого материала; α_i – температурный коэффициент линейного расширения металла;

$a = \frac{\lambda}{C_v}$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности;

C_v – объемная теплоемкость; $\bar{U}(\Phi, \tau)$ – суммарный вектор перемещений внутренней

точки $\Phi(x, y, z)$ поверхностного слоя под действием термомеханических усилий, сопровождающих процесс обработки; $l = \frac{1 + \tau_r \delta}{\delta}$ (τ_r – время релаксации); $\eta = \frac{\alpha_i \beta_i T(\Phi, \tau)}{\lambda}$; W – мощность теплового источника; C_q – скорость распространения тепла в обрабатываемом материале; τ – время; P_j – силы резания;

$$\text{grad}T(x, y, z) = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k},$$

$$\text{div} \vec{U}_j = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad (j = x, y, z).$$

Так как при финишных методах обработки тепловые явления превалируют над силовыми, то можно пренебречь в уравнении теплопроводности членом, учитывающим превращение механической энергии в тепловую, и мы приходим к уравнению теплопроводности гиперболического типа. Для разрешимости в явном виде указанной системы (1)–(2) будем пренебрегать влиянием инерционных членов и ограниченностью скорости распространения тепла. Более того, для преодоления аналитических трудностей, связанных с решением пространственных задач термоупругости, будем рассматривать плоскую задачу. Этот переход оправдан тем, что для исследования термомеханического состояния обрабатываемых поверхностей важной является информация о распространении температур и деформаций по глубине и в направлении движения источника.

При составлении расчетной схемы допускаем, что обрабатываемое изделие моделируется кусочно-однородной полуплоскостью, что позволяет изучать термомеханические процессы в нем в с несколькими типами покрытий толщиной Δa_k , наносимых на основную матрицу. Такая схема предопределяет тепловые и деформационные условия сопряжения слоев по границам их раздела a_k .

Влияние структурных неоднородностей, возникающих в материале как при выплавке, так и по ходу технологического процесса, будем учитывать в модели наличием в поверхностном слое включений и дефектов типа микротрещин.

Для более полного представления о роли дефектности материала в механизме снижения прочности рассмотрим следующую задачу. Допустим, в поверхностном слое покрытия рассеяны не взаимодействующие между собой поры с глубиной залегания намного меньшей, чем их протяженность, причем они находятся в пределах толщины съема материала за один проход. Пусть в зоне контакта S инструмента с деталью содержится дефект типа воздушной поры, длина которого равна $2l$. Выберем систему координат XOY так, чтобы этот дефект располагался вдоль оси OX с центром в начале координат. Принятый выбор направления дефекта соответствует наиболее вероятному развитию этого дефекта в трещину.

Определение температурного поля на поверхности покрытия сводится к решению следующей краевой задачи [13–14]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (3)$$

$$T = \begin{cases} T_k, & x, y \in S_k, \\ 0, & x, y \notin S_k, \end{cases} \quad (4)$$

где $T(x, y, \tau)$ – температура изделия в точке (x, y) в момент времени τ ; T_k – контактная температура на поверхности изделия, формирующаяся при механической обработке.

Методом интегральных преобразований можно получить решение поставленной задачи в виде:

$$T(x, y, \tau) = \frac{T_k}{4} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x+b_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{x-b_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+b_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{y-b_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right], \quad (5)$$

где $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du$, a – коэффициент температуропроводности материала покрытия.

Компоненты тензора напряжения σ_x , σ_y , τ_{xy} выражаются через термоупругий потенциал перемещений Ψ в виде [15]:

$$\sigma_x = -2G \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = -2G \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = 2G \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y \partial x}, \quad (6)$$

$$\Delta \Psi = (1+\nu) \alpha_t T(x, y, \tau), \quad (7)$$

где G – модуль сдвига; ν – коэффициент Пуассона, α_t – температурный коэффициент линейного расширения.

Дифференцируя (7) по τ и учитывая (3)–(4), получим:

$$\Delta \left[\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} - (1+\nu) \alpha_t a T(x, y, \tau) \right] = 0. \quad (8)$$

Из последнего выражения видно, что функция $\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} - (1+\nu) \alpha_t a T$ является гармонической по всей плоскости и, следовательно, может быть либо постоянной, либо некоторой функцией времени $g(\tau)$. Введем в рассмотрение вместо потенциала Ψ его производную:

$$\Psi' = \Psi - \int_0^\tau g(\tau) d\tau.$$

Таким образом, для потенциала Ψ имеем уравнение:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} = (1+\nu) \alpha_t a T. \quad (9)$$

Інтегруючи (9), получим следующее соотношение для термоупругого потенциала:

$$\Psi = (1 + \nu)\alpha_t a \int_0^{\tau} T(x, y, \tau) d\tau + \Psi_0(x, y), \quad (10)$$

где $\Psi_0(x, y)$ – потенциал перемещений, соответствующий начальной температуре.

Отсюда получаем

$$\Psi_0(x, y) = -\frac{(1 + \nu)\alpha_t T_0}{2\pi} \iint \ln\left(\frac{1}{R}\right) d\xi d\eta, \quad (11)$$

где $R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$.

Подставляя в (7) выражение для $T(x, y, \tau)$ из (5) и учитывая, что вне зоны контакта инструмента с деталью $\Delta\Psi_0 = 0$, найдем:

$$\begin{aligned} \sigma_y = & -\frac{G(1 + \nu)\alpha_t T_k}{4\sqrt{\pi}} \left\{ 4\sqrt{\pi}\delta(x, y) + \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{y + \sqrt{\frac{Dh}{4}}}{x + b} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\frac{Dh}{4}} - y}{x - b} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\frac{Dh}{4}} - y}{x + b} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{\frac{Dh}{4}} + y}{x - b} \right) \right] - \right. \\ & \left. - \int_0^{\tau_k} \frac{1}{\tau\sqrt{a\tau}} \left[(x + b)e^{-\frac{(x+b)^2}{4a\tau}} + (x - b)e^{-\frac{(x-b)^2}{4a\tau}} \right] \times \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y + \sqrt{\frac{Dh}{4}}}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\frac{Dh}{4}} - y}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] d\tau \right\}, \quad (12) \end{aligned}$$

где $\delta(x, y) = \begin{cases} 1, & (x, y) \in S_k \\ 0, & (x, y) \notin S_k \end{cases}$.

Так как коэффициент интенсивности напряжений для изолированного дефекта определяется сингулярным интегральным уравнением с ядром Коши [16]:

$$K_1 = -\frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_{-l}^l \sigma_y(x, 0, \tau) \sqrt{\frac{l+x}{l-x}} dx,$$

то, используя (12), получим

$$\begin{aligned} K_1 = & \frac{GT_k(1 + \nu)\alpha_t}{\sqrt{\pi l}} \left\{ \pi l + \frac{2}{\pi} \int_{-l}^l \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{Dh}}{2(\xi + b)} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{Dh}}{2(b - \xi)} \right) \right] \sqrt{\frac{l + \xi}{l - \xi}} d\xi - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-l}^l \int_0^{\tau_k} \frac{1}{\tau\sqrt{a\tau}} \left[(\xi + b)e^{-\frac{(\xi+b)^2}{4a\tau}} + (b - \xi)e^{-\frac{(b-\xi)^2}{4a\tau}} \right] \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{Dh}}{4\sqrt{a\tau}} \right) \sqrt{\frac{l + \xi}{l - \xi}} d\tau d\xi \right\}. \quad (13) \end{aligned}$$

В случае, когда коэффициент интенсивности напряжений по величине приближается к локальному критерию разрушения K_C [17] материала обрабатываемого изделия, трещиноподобный дефект начинает развиваться в трещину. Таким образом, из последнего соотношения получаем условия равновесия дефектов длиной $2l$ в виде:

$$l_0 < \frac{K_C^2}{\pi [GT_k(1+\nu)\alpha_t]^2} \quad (14)$$

В этой формуле величина контактной температуры T_k в зоне обработки зависит от технологических параметров и свойств обрабатываемого материала, и может быть определена по формуле [18]

$$T_k = \frac{CV_{кр}}{\lambda\sqrt{Dh}V_g^2} \sqrt{\frac{\pi}{a_n}} \left[1 - e^{-\frac{V_0\sqrt{Dh}}{a\tau}} \right] \quad (15)$$

где $V_{кр}$, V_g , h – режимы обработки; D , C – параметры инструмента; λ , a_n – теплофизические характеристики обрабатываемого материала.

Адекватность построенной модели проверялась экспериментально на образцах из стали 45, на поверхность которых напылялось плазменное износостойкое покрытие на основе T_jC толщиной $\Delta = 0,4 - 0,6$ мм. Используя сканирующий электронный микроскоп было установлено, что в покрытии имеют место структурные дефекты длиной $2l = 40$ мкм. Физико-механические характеристики покрытия: $K_C = 2,0$ МПа·м^{1/2}; $\alpha_t = 8,58$ К⁻¹; $G = 168$ ГПа. Параметры механической обработки подбирались таким образом, чтобы контактная температура в зоне обработки достигала $T_k = 800^\circ\text{C}$. На поверхности сформировалась сетка трещин. Для того, чтобы структурные дефекты не развивались в магистральные трещины, то есть оставались в равновесном состоянии, при выполнении неравенства (14) необходимо подбирать режимы обработки таким образом, чтобы $T_k \leq 600^\circ\text{C}$.

Выводы

Разработанная модель позволяет учитывать влияние неоднородностей технологического происхождения (начиная с заготовки и заканчивая готовым изделием), которые возникают в поверхностном слое во время изготовления элементов конструкции на его разрушение.

Решение сингулярного интегрального уравнения с ядром Коши позволяет определить интенсивность напряжений в окрестности вершин дефектов типа трещин и, сравнивая ее с критерием трещиностойкости для материала конструктивного элемента, можно определить его состояние. В случае нарушения этого критерия дефект развивается в магистральную трещину.

Интенсивность образования трещин в поверхностном слое изделий на финишных операциях во многом определяется трещиностойкостью их материалов, которая формируется в процессе получения заготовки и последующих операций на ней.

Моделирование термомеханических процессов позволяет получить критериальное соотношение условия уравновешенного состояния дефекта в зависимости от градиентов контактной температуры.

Изучен механизм формирования и развития дефектов типа трещин в функционально-градиентных материалах неоднородной структуры под воздействием термомеханических явлений, сопровождающих технологию изготовления и эксплуатацию элементов конструкций.

Список использованной литературы

1. Якимов А. В., Слободяник П. Т., Усов А. В. Теплофизика механической обработки. К.: Наукова думка, 1991. 270 с.
2. Кормилицина Е. А., Сальковский Ф. М., Усов А. В., Якимов А. В. Причины появления дефектов при шлифовании магнитотвердых сплавов. *Технология электротехнического производства*. 1982. № 4. С. 1–5.
3. Григорян Г. Д., Усов А. В., Чапля М. Э. Влияние шлифовочных дефектов на прочность деталей несущей системы. *Надежность и долговечность машин и приборов*: тезисы докладов II Всесоюзной научно-технической конференции. (г. Куйбышев, сентябрь, 14-17 сентября, 1984). Куйбышев: Ж. Тр. КПИ, 1984. С. 101–106.
4. Энштин Е. Д., Гуревич Р. И. Влияние величины зерна аустенита на механические свойства хромоникелевых конструкционных сталей. *Физика и химия обработки материалов*. 1976. №6. С. 99–103.
5. Бабей Ю. И., Бережницкий М. Ф., Романив О. Н., Крыскив А. С. Влияние механической обработки на трещиностойкость стальных деталей. *ФХММ*. 1978. № 1. С. 37–41.
6. Романив О. Н., Ткач А. Н., Крыскив А. С. Исследование обратимой отпускной хрупкости сталей методами механики разрушения. *ФХММ*. 1980. № 2. С. 41–47.
7. Бурнаков К. К., Мостальгин Г. П. Причины трещинообразования при шлифовании. *Вестник машиностроения*. 1975. № 9. С. 60–61.
8. Анельчик В. Д. Повышение эффективности шлифования деталей с молибденовым покрытием: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Одесский политехнический ин-т. Одесса, 1985. 242 с.
9. Усов А. В. Смешанная задача термоупругости для кусочно-однородных тел с включениями и трещинами. *Смешанные задачи механики деформируемого тела*: тезисы докладов IV Всесоюзной конференции. (г. Одесса, сентябрь 11-14 сентября, 1996). Одесса: ОГПУ, 1996. С. 116.
10. Усов А. В. Влияние гетерогенной структуры материалов на трещиностойкость. *Технологическое обеспечение функциональных параметров качества поверхностного слоя деталей машин*. Сб. трудов БМИ, Брянск, 1987. С. 137–149.
11. Коваленко А. Д. Основы термоупругости. К.: Наукова думка, 1970. 307 с.
12. Галицин А. С., Жуковский А. Н. Интегральные преобразования и специальные функции в задачах теплопроводности. К.: Наукова думка, 1976. 320 с.
13. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
14. Усов А. В. О некоторых интегральных уравнениях термоупругости для кусочно-однородных тел с дефектами и включениями. *Интегральные уравнения в прикладном моделировании*: тезисы докладов III Республиканской конференции. (г. Одесса, сентябрь, 11-14 сентября, 1999). Одесса: ОГПУ, 1996. С. 115–116.
15. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. М.: Физматгиз, 1963. 252 с.
16. Мухелишвили Н. И. Сингулярные интегральные уравнения. М.: Наука, 1968. 512 с.
17. Панасюк В. В. Метод сингулярных интегральных уравнений в двумерных задачах дифракции. К.: Наук. думка, 1984. 344 с.
18. Оборский Г. А., Дащенко А. Ф., Усов А. В., Дмитришин Д. В. Моделирование систем: монография. Одесса: Астропринт, 2013. 664 с.

References

1. Yakimov, A. V., Slobodyanik, P. T., & Usov A. V. (1991). *Teplofizika mehanicheskoy obrabotki*. K.: Naukova dumka.
2. Kormilitsina, E. A., Salkovskiy, F. M., Usov, A. V., & Yakimov, A. V. (1982). Prichinyi poyavleniya defektov pri shlifovanii magnitotverdyih splavov. *Tehnologiya elektrotehnicheskogo proizvodstva*. **4**, 1–5.
3. Grigoryan, G. D., Usov, A. V., & Chaplya, M. E. (1984) Vliyanie shlifovochnyih defektov na prochnost detaley nesuschey sistemyi. Proceedings of the *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i priborov: tezisyi dokladov II Vsesoyuznoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii*. (Kuybyishev, sentybr, 14-17 sentybyry, 1984), Kuybyishev, Zh Tr.KPI, 1984 pp. 101–106.
4. Enshtin, E. D., & Gurevich, R. I. (1976). Vliyanie velichinyi zerna austenita na mehanicheskie svoystva hromonikelevyih konstruksionnyih staley. *Fizika i himiya obrabotki materialov*. **6**, 99–103.
5. Babey, Yu. I., Berezhnitskiy, M. F., Romaniv, O. N., & Kryiskiv, A. S. (1978). Vliyanie mehanicheskoy obrabotki na treschinostoykost stalnyih detaley. *FHMM*. **1**, 37–41.
6. Romaniv, O. N., Tkach, A. N., & Kryiskiv, A. S. (1980). Issledovanie obratimoy otpusknoy hrupkosti staley metodami mehaniki razrusheniya. *FHMM*. **2**, 41 - 47.
7. Burnakov, K. K., & Mostalyigin, G. P. (1975). Prichinyi treschinoobrazovaniya pri shlifovanii. *Vestnik mashinostroeniya*. **9**, 60–61.
8. Anelchik, V. D. (1985). Povyishenie effektivnosti shlifovaniya detaley s molibdenovym pokryтием. (PhD thesis), Odessa: Odesskiy politehnicheskii in-t.
9. Usov, A. V. (1996) Smeshannaya zadacha termouprugosti dlya kusochno-odnorodnyih tel s vklyucheniymi i treschinami. Proceedings of the *Smeshannyye zadachi mehaniki deformiruemogo tela: tezisyi dokladov IV Vsesoyuznoy konferentsii*. (Odessa, sentybr 11-14 sentybyry ,1996). Odessa: OGPU, pp. 116.
10. Usov, A. V. (1987). Vliyanie geterogennoy strukturyi materialov na treschinostoykost. *Tehnologicheskoe obespechenie funktsionalnyih parametrov kachestva poverhnostnogo sloya detaley mashin*. Sb Tr BMI, Bryansk, pp. 137–149.
11. Kovalenko, A. D. (1970). *Osnovy termouprugosti*. K.: Naukova dumka.
12. Galitsin, A. S., & Zhukovskiy, A. N. (1976). Integralnyie preobrazovaniya i spetsialnyie funktsii v zadachah teploprovodnosti. K.: Naukova dumka.
13. Cherepanov, G. P. (1974). *Mehanika hrupkogo razrusheniya*. M.: Nauka.
14. Usov, A. V. (1999) O nekotoryih integralnyih uravneniyah termouprugosti dlya kusochno-odnorodnyih tel s defektami i vklyucheniymi. Proceedings of the *Integralnyie uravneniya v prikladnom modelirovanii: tezisyi dokladov III Respublikanskooy konferentsii*. (Odessa, sentybr 11-14 sentybyry ,1999), Odessa: OGPU, pp. 115–116.
15. Parkus, G. (1963). *Neustanovivshiesya temperaturnyye napryazheniya*. M.: Fizmatgiz.
16. Mushelishvili, N. I. (1968). *Singulyarnyye integralnyie uravneniya*. M.: Nauka.
17. Panasyuk, V. V. (1984). *Metod singulyarnyih integralnyih uravneniy v dvumernyih zadachah difraktsii*. K.: Nauk. dumka.
18. Oborskiy, G. A., Daschenko, A. F., Usov, A. V., & Dmitrishin. D. V. (2013). *Modelirovanie sistem: monografiya*. Odessa: Astroprint.

Усов Анатолій Васильович – д.т.н., професор, завідувач кафедри вищої математики та моделювання систем Одеського національного політехнічного університету, e-mail: usov_a_v@onu.ua, ORCID: 0000-0002-3965-7611.

Сікіраш Юлія Євгенівна – асистент кафедри вищої математики та моделювання систем Одеського національного політехнічного університету, e-mail: u.e.sikirash@onu.ua, ORCID: 0000-0003-0853-582X.

ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КВАДРАТНОЇ ПЛАСТИНКИ

У сучасному виробництві широке поширення одержали системи автоматизованого проектування, які дозволяють проектувати технологічні процеси з меншими витратами часу та засобів, зі збільшенням точності спроектованих процесів і програм обробки, що скорочує витрати матеріалів та час обробки, завдяки тому, що режими обробки також розраховуються та оптимізуються за допомогою ЕОМ.

Розробка методів і моделей машинного навчання дозволяє робити швидкі оцінки необхідних параметрів стану об'єкту. З практичної точки зору моделі машинного навчання для прогнозування значень параметрів стану конструкції можуть слугувати як інтерактивні асистенти у процесі проектування. Одним із актуальних питань застосувань нейронних мереж є їхня структурна оптимізація, тобто, вибір оптимальної кількості шарів, нейронів, функцій активації тощо. Така оптимізація може проводитися як вручну, за умови відносно невеликої кількості параметрів, так і в автоматичному режимі.

У даній роботі розглянуто особливості використання генетичного алгоритму для оптимізації параметрів нейронної мережі для прогнозування напружено-деформованого стану квадратної пластинки. Тестову вибірку, яка містить можливі стани пластинки у залежності від геометричних і фізико-механічних параметрів, побудовано з використанням аналітичних формул і методу скінченних елементів. Суттєвим етапом генетичних алгоритмів є визначення генетичних операторів: селекції, кросоверу, мутації та відбору. Вибір цих операторів впливає на збіжність та ефективність методу в цілому. Генетичний алгоритм є прикладом метаевристичних методів. Збіжність таких методів у загальному випадку досить важко довести формально. Однак, застосування генетичного алгоритму під час налаштування нейронних мереж дозволяє знизити втручання користувача до мінімуму. Використано генетичний алгоритм для оптимізації параметрів нейронної мережі при прогнозуванні напружено-деформованого стану квадратної пластини. Побудовано моделі навчання на базі штучних нейронних мереж. Побудовані моделі дозволяють прогнозувати прогин у центрі пластинки, а також максимальне значення інтенсивності напружень за Мізесом. Основною перевагою штучної нейронної мережі є швидкість прогнозування. Обчислення необхідних характеристик у порівнянні з методом скінченних елементів відбувається майже миттєво (мілісекунди). Отже, «натреновані» штучні нейронні мережі можуть слугувати як інтерактивні помічники у процесі проектування.

Ключові слова: машинне навчання; штучна нейронна мережа; генетичний алгоритм; популяція; фітнес-функція; схрещування; мутація; напружено-деформований стан; пластинка; прогнозування.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КВАДРАТНОЙ ПЛАСТИНКИ

В современном производстве широкое распространение получили системы автоматизированного проектирования, которые позволяют проектировать технологические процессы с меньшими затратами времени и средств, с увеличением точности спроектированных процессов и программ обработки, сокращают расходы материалов и время обработки благодаря тому, что режимы обработки также рассчитываются и оптимизируются с помощью ЭВМ.

Разработка методов и моделей машинного обучения позволяет делать быстрые оценки необходимых параметров состояния объекта. С практической точки зрения модели машинного обучения для прогнозирования значений параметров состояния конструкции могут служить как интерактивные ассистенты в процессе проектирования. Одним из актуальных вопросов применений нейронных сетей является их структурная оптимизация, то есть, выбор оптимального количества слоев, нейронов, функций активации и тому подобное. Такая оптимизация может проводиться как вручную, при условии относительно небольшого количества параметров, так и в автоматическом режиме. В данной работе рассмотрены особенности использования генетического алгоритма для оптимизации параметров нейронной сети для прогнозирования напряженно-деформированного состояния квадратной пластинки. Тестовую выборку, которая содержит возможные состояния пластинки в зависимости от геометрических и физико-механических параметров, построено с использованием аналитических формул и метода конечных элементов. Существенным этапом генетических алгоритмов является определение генетических операторов: селекции, кроссовера, мутации и отбора. Выбор этих операторов влияет на сходимость и эффективность метода в целом. Генетический алгоритм является примером метаэвристических методов. Сходимость таких методов в общем случае достаточно трудно доказать формально. Однако, применение генетического алгоритма при настройке нейронных сетей позволяет снизить вмешательство пользователя к минимуму. В работе использован генетический алгоритм для оптимизации параметров нейронной сети при прогнозировании напряженно-деформированного состояния квадратной пластины. Построены модели обучения на базе искусственных нейронных сетей. Построенные модели позволяют прогнозировать прогиб в центре пластинки, а также максимальное значение интенсивности напряжений по Мизесу. Основным преимуществом искусственной нейронной сети является скорость прогнозирования. Вычисления требуемых характеристик по сравнению с методом конечных элементов происходит почти мгновенно (миллисекунды). В итоге «натренированные» искусственные нейронные сети могут служить как интерактивные помощники в процессе проектирования.

Ключевые слова: машинное обучение; искусственная нейронная сеть; генетический алгоритм; популяция; мутация; фитнес-функция; скрещивание; напряженно-деформированное состояние; пластинка; прогнозирование.

THE USE OF A GENETIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE PARAMETERS OF THE NEURAL NETWORK IN PREDICTING THE STRESS-STRAIN STATE OF A SQUARED PLATE

In modern production, computer-aided design systems have become widespread, which allow to design technological processes with less time and money, with increased accuracy of designed processes and processing programs, which reduces material costs and processing time, due to the fact that processing modes are also calculated and optimized using a computer.

The development of machine learning methods and models allows to make quick estimates of the necessary parameters of the state of the object. From a practical point of view, machine learning models for predicting the values of structural parameters can serve as interactive assistants in the design process. One of the main issues in the application of neural networks is their structural optimization, the choice of the optimal number of layers, neurons, activation functions and so on. Such optimization can be performed both manually, provided a relatively small number of parameters, and automatically. This paper considers the peculiarities of using a genetic algorithm to optimize the parameters of the neural network to predict the stress-strain state of a square plate. The test sample, which contains the possible states of the plate depending on the geometric and mechanical parameters, was constructed using analytical formulas and the finite element method. An essential stage of genetic algorithms is the definition of genetic operators: selection, crossover, mutation and selection. The choice of these operators affects the convergence and efficiency of the method as a whole. The genetic algorithm is an example of metaheuristic methods. The convergence of such methods is quite difficult to prove formally. However, the use of a genetic algorithm when setting up neural networks can minimize user intervention. A genetic algorithm is used to optimize the parameters of the neural network for predicting the stress-strain state of a square plate. Learning models based on artificial neural networks are built. The constructed models allow predicting the deflection in the center of the plate, as well as the maximum value of the stress intensity according to Mises. The main advantage of an artificial neural network is the speed of prediction. The calculation of the required characteristics in comparison with the finite element method is almost instantaneous (milliseconds). Thus, «trained» artificial neural networks can serve as interactive assistants in the design process.

Keywords: machine learning; artificial neural network; genetic algorithm; population; mutation; crossover; stress-strain state; plate; prediction; regression.

Постановка проблеми

Розвиток систем автоматизованого проектування здійснюється при постійному швидкому удосконаленні як засобів, так і програмного забезпечення автоматизованого проектування. Використання на практиці основоположних знань потребує додаткового цілеспрямованого ознайомлення з новими сучасними засобами і програмами.

У сучасному виробництві широке поширення одержали системи автоматизованого проектування, які дозволяють проектувати технологічні процеси з меншими витратами часу та засобів, зі збільшенням точності спроектованих процесів і програм обробки, що скорочує витрати матеріалів та час обробки, завдяки тому, що режими обробки також розраховуються та оптимізуються за допомогою ЕОМ.

Розробка методів і моделей машинного навчання дозволяє робити швидкі оцінки необхідних параметрів стану об'єкту. З практичної точки зору моделі машинного

навчання для прогнозування значень параметрів стану конструкції можуть слугувати як інтерактивні асистенти у процесі проектування.

Задачу прогнозування параметрів стану об'єкта за його геометричними та фізико-механічними параметрами можна віднести до класу задач регресії. У запропонованій роботі на прикладі прогнозування напружено-деформованого стану затисненої за периметром квадратної пластинки з ізотропного матеріалу, яка знаходиться під дією рівномірно розподіленого по поверхні поперечного тиску, досліджено метод використання генетичного алгоритму для моделі машинного навчання та можливі реалізації цих моделей [1].

В практичних задачах саме структурна та параметрична оптимізація вимагає суттєвих часових затрат та експертних знань предметної області. Одним з методів, що дозволяє уникнути такого ручного налаштування роботи системи є генетичні алгоритми. Загальна схема застосування генетичних алгоритмів до нейронних мереж полягає у наступному. На першому етапі слід обрати спосіб кодування суттєвих параметрів нейронної мережі у вигляді бінарного або числового вектору. Такі вектори формують деяку базову множину розв'язків, в якій здійснюється пошук оптимального розв'язку. Після цього, обирається цільової функція, яка буде визначати найбільш вдалу архітектуру окремих нейронних мереж та структуру. Така функція повинна бути близькою за значенням до функції втрат, що використовуються при навчанні нейромереж. Суттєвим етапом генетичних є визначення генетичних операторів: селекції, кросоверу, мутації та відбору. Вибір цих операторів впливає на збіжність та ефективність методу в цілому. Генетичний алгоритм є прикладом метаевристичних методів. Збіжність таких методів у загальному випадку досить важко довести формально. Однак, застосування генетичного алгоритму під час налаштування нейронних мереж дозволяє знизити втручання користувача до мінімуму. Іншим відомим підходом до покращення ефективності систем розпізнавання є використання ансамблів – поєднань декількох моделей з генерацією спільного результату.

Одним із актуальних питань застосувань нейронних мереж є їхня структурна оптимізація, тобто, вибір оптимальної кількості шарів, нейронів, функцій активації тощо. Така оптимізація може проводитися як вручну, за умови відносно невеликої кількості параметрів, так і в автоматичному режимі. Генетичні алгоритми досить давно використовуються для задач структурної оптимізації нейронних мереж [3], однак, вони менше застосовувались для підбору параметрів ансамблів мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом зі зростанням популярності штучних нейронних мереж збільшується кількість досліджень щодо розробки моделей та застосування їх можливостей у задачах механіки деформованого твердого тіла.

Наприклад, у роботах [2–4] досліджено можливості машинного навчання для розв'язання задач механіки руйнування. Зокрема, у роботі [2] для навчання нейронної мережі прогнозувати можливі зони руйнування балок використано дані 64 обчислювальних експериментів та 3 натурних. У роботі [3] розроблено нейронну мережу, яка базується на фільтрі Калмана (англ. Kalman filter), для прогнозування руйнування швидкісної дороги на мосту шляхом обробки даних про температуру та коливання. В [5–6] детально розглянуто основні етапи побудови ансамблів нейромереж. Пропонується підхід до генерації моделей ансамблю, з яких методом к-середніх проводиться відбір для подальшого навчання.

В роботі [7] пропонується поняття спільного навчання як альтернатива ансамблевому навчанню. Вводяться функції втрат для оптимізації нейронних мереж саме при спільному навчанні.

Роботи [8–9] присвячено особливостям використання генетичних алгоритмів при створенні ансамблів. Автори пропонують підхід, в якому нейронні мережі та структура ансамблю поєднуються в одну популяцію. По-перше, створюється набір нейронних мереж з високим ступенем різноманітності. Для цього використовуються різні набори навчальних даних для кожної моделі, а також варіюється архітектура шляхом зміни кількості прихованих нейронів, функцій активації та ініціалізації ваг. По-друге, генетичний алгоритм використовується для вибору як найбільш ефективної підмножини синтезованих нейронних мереж, так і оптимальної комбінаційної стратегії для забезпечення точності та надійності ансамблю. Така схема застосування генетичних алгоритмів до нейронних мереж та їх ансамблів є типовою.

Одним із недоліків використання ансамблів нейронних мереж є висока вимогливість до часових та просторових ресурсів, оскільки час навчання збільшується пропорційно до кількості нейронних мереж в ансамблі. Особливо цей недолік стосується глибинних нейронних мереж.

Покроковий алгоритм донавчання нейронної моделі, який дозволяє розв'язувати задачі динаміки будівельних конструкцій, розроблено у роботі [9]. Розроблений алгоритм дозволяє прогнозувати напружено-деформований стан конструкції, яка знаходиться під дією тривалого або короткочасного навантаження.

Для розв'язання задач проектування також використовують генетичні алгоритми. Наприклад, у роботі [10] для оптимального проектування будівельних конструкцій. У роботі [11] запропоновано метод розв'язання нелінійних крайових задач для звичайних диференціальних рівнянь другого порядку, який застосовує генетичні алгоритми для знаходження оптимальних значень параметрів наближених розв'язань. Проте його практичне застосування пов'язане з необхідністю емпіричного підбору деяких параметрів та великою кількістю ітерацій для отримання прийняттого результату.

Отже, аналіз останніх досліджень і публікацій дозволяє зробити висновок про актуальність розробки моделей на базі нейронних мереж для прогнозування напружено-деформованого стану з використанням генетичного алгоритму. Можливості нейронних мереж для прогнозування стану оболонкових конструкцій потребують дослідження.

Мета дослідження

Мета дослідження – розробка штучної нейронної мережі для прогнозування напружено-деформованого стану затисненої за периметром квадратної пластинки із ізотропного матеріалу, яка знаходиться під дією рівномірно розподіленого по поверхні поперечного тиску з використанням генетичного алгоритму.

Об'єкт дослідження – напружено-деформований стан квадратної пластинки із ізотропного матеріалу, яка знаходиться під дією рівномірно розподіленого по поверхні поперечного тиску.

Предмет дослідження – методи і моделі машинного навчання для регресійного аналізу.

Задачі дослідження:

1) розробити алгоритм формування вибірки для навчання та тестування моделей;

2) застосувати генетичний алгоритм до розробленої нейронної мережі для прогнозування максимального прогину пластинки;

3) оптимізувати параметри нейронної мережі з використанням генетичного алгоритму для прогнозування максимальних значень прогину та інтенсивності напружень за Мізесом у пластинці.

Викладення основного матеріалу дослідження

1. Алгоритм побудови вибірки для навчання та тестування моделей

Максимальний прогин (у центрі) квадратної пластинки із ізотропного матеріалу, що знаходиться під дією рівномірно розподіленого по поверхні поперечного тиску, сторони якої жорстко затиснені, обчислюється за допомогою відомої аналітичної формули:

$$w_{\max} = 0,00126 \cdot q \cdot a^4 \frac{12(1-\nu^2)}{Eh^3}, \quad (1)$$

де q – значення тиску; a – розмір сторони пластинки; h – її товщина; ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль Юнга.

Математичну модель пластинки довільної форми можна отримати з використанням теорії Тимошенко-Міндліна (теорія зсувних деформацій першого порядку). Енергія деформацій скінченного елемента об'єму V_e , серединна площина якого збігається з xOy , має вигляд:

$$U_p = \frac{1}{2} d_e^T \int_{V_e} (z^2 B_f^T D_f B_f) dV_e d_e + \frac{\kappa}{2} d_e^T \int_{V_e} (B_c^T D_c B_c) dV_e d_e, \quad (2)$$

де $d_e^T = \{w_1 \theta_{x1} \theta_{y1} \dots w_m \theta_{xm} \theta_{ym}\}$ – вектор узагальнених переміщень (w – прогин серединної площини, θ_x, θ_y – обертання нормалі серединної площини відносно відповідних осей координат); B_f і B_c – матриці зв'язків між переміщеннями та деформаціями; D_f і D_c – матриці зв'язків між напруженнями та деформаціями; параметр κ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу дотичних напружень у перерізі (для ізотропного матеріалу $\kappa = 5/6$); m – кількість вузлів у скінченному елементі.

Матриці B_f і B_c для ізотропного матеріалу мають вигляд:

$$B_f = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \dots & 0 & \frac{\partial N_m}{\partial x} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \dots & 0 & 0 & \frac{\partial N_m}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \dots & 0 & \frac{\partial N_m}{\partial y} & \frac{\partial N_m}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & N_1 & 0 & \dots & \frac{\partial N_m}{\partial x} & N_m & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & N_1 & \dots & \frac{\partial N_m}{\partial y} & 0 & N_m \end{bmatrix},$$

де N_i – функція форми i -го вузла скінченного елемента.

Матриці D_f і D_c відповідають плосконапруженому стану та мають такий вигляд:

$$D_f = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad D_c = \begin{bmatrix} G & 0 \\ 0 & G \end{bmatrix},$$

де E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; G – модуль зсуву.

Після інтегрування (2) по товщині отримаємо таку формулу для матриці жорсткості:

$$K_{ep} = \frac{h^3}{12} \int_{\Omega_e} (B_f^T D_f B_f) d\Omega_e + \kappa h \int_{\Omega_e} (B_c^T D_c B_c) d\Omega_e . \quad (3)$$

2. Прогнозування максимального прогину пластинки з використанням генетичного алгоритму

Теорію еволюційних, зокрема, генетичних алгоритмів на даний час добре розроблено, наприклад, у роботі [13–14] формалізовано основні поняття та приклади застосувань до задач дискретної оптимізації.

Загальна схема застосування генетичних алгоритмів до нейронних мереж полягає у наступному. На першому етапі слід обрати спосіб кодування суттєвих параметрів нейронної мережі у вигляді бінарного або числового вектору. Такі вектори формують деяку базову множину розв'язків X , в якій здійснюється пошук оптимального розв'язку. Скінченні непорожні множини X називаються популяціями [14].

Наступним кроком є вибір цільової функції $f: X \rightarrow R^1$, яка буде визначати найбільш вдалу архітектуру окремих нейронних мереж та структуру ансамблю в цілому. Така функція повинна бути близькою за значенням до функції втрат, що використовуються при навчанні нейромереж.

Далі визначаються стандартні для генетичних алгоритмів оператори: селекції, кросоверу, мутації та відбору.

У роботі було створено декілька шарів, що мають певну кількість штучних нейронів. Перший шар (зовнішній) має кількість нейронів, яка дорівнює кількості вхідних параметрів, а саме a , h , E , ϑ і q . Також вхідний шар нейронів має функцію активації, що зв'язує його з внутрішніми шарами нейронів. Внутрішні шари мають певну кількість нейронів, кожен з яких зв'язаний з внутрішньою функцією активації. Останній шар (також зовнішній) має кількість нейронів, яка дорівнює кількості вихідних значень.

Для оптимізації структури нейромережі з використанням генетичного алгоритму, що працює з параметрами нейронної мережі і визначає найкращу їх комбінацію забезпечення точності, необхідно задати наступні параметри та їх діапазони значень:

- 1) кількість нейронів у вхідному шарі, $[m; 4m]$, де m – кількість вхідних параметрів;
- 2) кількість внутрішніх шарів, $[0, 16]$;
- 3) кількість нейронів у внутрішньому шарі, $[m; 4m]$, де m – кількість вхідних параметрів;
- 4) функції активації між вхідним та внутрішніми шарами, визначаються функціями: гіперболічний тангенс – $\tanh(x)$, ReLU, сигмоїда – $S(x)$.
- 5) функції активації між внутрішніми шарами.

Генетичний алгоритм використовується для вирішення задачі дискретної оптимізації де на початку випадковим чином створюється деяка початкова популяція (Population Size (10)), що складається з векторів, які містять задані п'ять параметрів, що описують архітектуру нейронної мережі. Вектори генеруються випадковим чином для визначення найкращого результату. Згенерована популяція векторів визначає структуру нейромережі. Для кожного вектора знаходимо фітнес-функцію, яка є

середньоквадратичним відхиленням нейромережі від рішення. Фітнес-функція – це особливий тип цільової функції, який застосовують як порівняльний показник якості для підбивання підсумку того, наскільки близьким є задане конструктивне рішення до досягнення поставлених цілей. Фітнес-функції застосовують в генетичному програмуванні та генетичних алгоритмах, щоб скеровувати симуляції до оптимальних конструктивних рішень. Наступним кроком є сортування отриманих значень функції у порядку убавання, таким чином, що на першому місці буде знаходитись найкращий отриманий результат, а на останньому – найгірший.

Далі відбувається операція схрещування (crossover), основна задача якої – створити нову популяцію з вже існуючої, тобто особини популяції у кількості $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$, де n – кількість членів популяції, схрещуються з першим членом та відбувається процес мутації. Останні члени популяції генеруються випадково. На рис.1 зображено поведінку першого члена популяції, а саме як змінювалась кількість нейронів у вхідному шарі, кількість внутрішніх шарів та кількість нейронів у внутрішніх шарах.

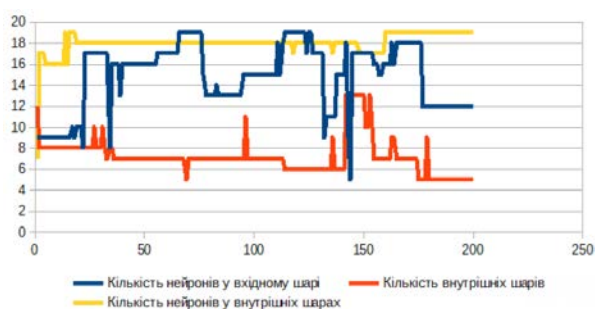


Рис. 1. Поведінка першого члена популяції.

Для регресійного аналізу прогину квадратної пластинки було використано вибірку, що містить результати 200 обчислювальних експериментів. На рис. 2 порівняно значення прогину (рис. 2, а) та інтенсивності напружень (рис. 2, б), отримані за допомогою методу скінченних елементів, зі значеннями, отриманими за допомогою нейронної мережі, у залежності від товщини пластинки.

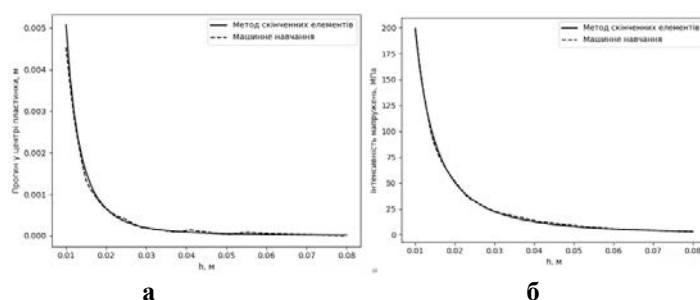


Рис. 3. Порівняння скінченно-елементного розв’язку з результатами машинного навчання: прогин та інтенсивність напружень у залежності від товщини пластинки.

Отже, штучні нейронні мережі дозволяють роботи прогноз одночасно декількох характеристик напружено-деформованого стану конструкції. Водночас похибка відносно скінченно-елементного розв’язку у межах 10%.

Висновки

У відповідності до мети роботи було використано генетичний алгоритм для оптимізації нейронних мережі для прогнозування напружено-деформованого стану

квадратної пластинки із ізотропного матеріалу, яка знаходиться під дією рівномірно розподіленого по поверхні поперечного тиску. Розроблено алгоритм формування вибірки для навчання та тестування моделей. Розроблений алгоритм базується на використанні аналітичної формули та методу скінченних елементів для обчислення компонент напружено-деформованого стану. Досліджено можливості генетичного алгоритму для регресійного аналізу і прогнозування максимального прогину пластинки. Виявлено, що алгоритм дозволяє прогнозувати значення прогину з похибкою приблизно 10% відносно аналітичного рішення. Розроблено нейронну мережу для прогнозування максимальних значень прогину та інтенсивності напружень за Мізесом у пластинці з використанням генетичного алгоритму. Основною перевагою штучної нейронної мережі є швидкість прогнозування: обчислення необхідних характеристик у порівнянні з методом скінченних елементів відбувається майже миттєво (мілісекунди). Отже, «натреновані» штучні нейронні мережі можуть слугувати як інтерактивні помічники у процесі проектування.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою штучних нейронних мереж, які дозволять прогнозувати напружено-деформований стан за кресленням або зображенням оболонкових конструкцій з використанням машинного зору і алгоритмів класифікації.

Список використаної літератури

1. Последовательная модель. URL: <https://www.tensorflow.org/guide/keras> (дата звернення: 19.06.2020).
2. Abambres M., Marcy M., Doz G. Potential of Neural Networks for Structural Damage Localization. *ACI Advances En Ciencias E Ingenierías*. 2018. Vol. 11. № 2. P. 124–153. DOI: 10.31224/osf.io/rghpf.
3. Jin C., Jang S., Sun X. et. al. Damage Detection of a Highway Bridge under Severe Temperature Changes Using Extended Kalman Filter Trained Neural Network. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2016. Vol. 6. Issue 3. P. 545–560.
4. Onur Avci P. O., Abdeljaber A. O. Self-Organizing Maps for Structural Damage Detection: A Novel Unsupervised Vibration-Based Algorithm. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016. Vol. 30. Issue 3. P. 1–11.
5. Li K., Liu W., Zhao K., Shao M., Liu L. A Novel Dynamic Weight Neural Network Ensemble Model. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2015. Vol. 11. Article ID 862056. 13 p. DOI: 10.1155/2015/862056.
6. Tao S. Deep Neural Network Ensembles. URL: <https://arxiv.org/abs/1904.05488>.
7. Webb A.M., Reynolds C., Iliescu D.-A., Reeve H., Lujan M., Brown G. Joint Training of Neural Network Ensembles. URL: <https://arxiv.org/abs/1902.04422>.
8. Sallam H., Regazzoni Carlo S., Talkhan Ihab E., Atiya A. Evolving Neural Networks Ensembles NNEs. *IAPR Workshop on Cognitive Information Processing*. (Greece, Santorini, June 9-10, 2008). P. 142–147.
9. Symone G. Soares, Carlos H. Antunes, Rui Arajo. A Genetic Algorithm for Designing Neural Network Ensembles. *14th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. (Canada, Montreal, July 8-12, 2009). New York: Association for Computing Machinery, 2009. P. 681–688.
10. Максимова О. М. Развитие и применение нейросетевых технологий для задач механики и строительных конструкций. *Вестник ИрГТУ*. 2013. № 8 (79). С. 81–88.
11. Лесовик Р. В. Оптимальное проектирование строительных конструкций на основе генетического алгоритма. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2010. № 2. С. 20–24.

12. Вакал Л. П. Генетичні алгоритми як інструмент розв'язання нелінійних крайових задач. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2015. № 14. С. 16–23.
13. Олійник А. О., Субботін С. О., Олійник О. О. Еволюційні обчислення та програмування. Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. 324 с.
14. Козин И. В. Эволюционные модели в дискретной оптимизации. Запорожье: ЗНУ, 2019. 204 с.

References

1. Posledovatel'naya model. (2020). Retrieved from: <https://www.tensorflow.org/guide/keras>.
2. Abambres, M., Marcy, M., & Doz, G. (2018). Potential of Neural Networks for Structural Damage Localization. *ACI Avances En Ciencias E Ingenierías*. **11**, 2, 124–153. DOI: 10.31224/osf.io/rghpf.
3. Jin, C., Jang, S., & Sun, X. et. al. (2016). Damage Detection of a Highway Bridge under Severe Temperature Changes Using Extended Kalman Filter Trained Neural Network. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. **6**, 3, 545–560.
4. Onur, Avci P. O., & Abdeljaber, A. O. (2016). Self-Organizing Maps for Structural Damage Detection: A Novel Unsupervised Vibration-Based Algorithm. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. **30**, 3, 1–11.
5. Li, K., Liu, W., Zhao, K., Shao, M., & Liu, L. (2015). A Novel Dynamic Weight Neural Network Ensemble Model. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. **11**, Article ID 862056, 13 p. DOI: 10.1155/2015/862056.
6. Tao, S. Deep Neural Network Ensembles. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/1904.05488>.
7. Webb, A. M., Reynolds, C., Iliescu, D.-A., Reeve, H., Lujan, M., & Brown, G. Joint Training of Neural Network Ensembles. Retrieved from: <https://arxiv.org/abs/1902.04422>.
8. Sallam H., Regazzoni Carlo S., Talkhan Ihab E., Atiya A. (2008). Evolving Neural Networks Ensembles NNEs. *IAPR Workshop on Cognitive Information Processing*. (Greece, Santorini, June 9-10, 2008), pp. 142–147.
9. Symone, G. Soares, Carlos, H. Antunes, & Rui Arajo. (2009). A Genetic Algorithm for Designing Neural Network Ensembles. *14th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. (Canada, Montreal, July 8-12, 2009). New York: Association for Computing Machinery, pp. 681–688.
10. Maksymova, O. M. (2013). Razvitie s primeneniye neurosetevih tehnologiy dlia zadach mahaniki I stroitel'nykh konstruktsiy. *Vestnik IrGTU*. **8**, 79, 81-88.
11. Lesovik, R. V. (2010). Optimal'noye proyektirovaniye stroitel'nykh konstruktsiy na osnove geneticheskogo algoritma. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy*. **2**, 20–24.
12. Vakal, L. P. (2015). Henetichni alhorytmy yak instrument rozv'yazannya neliniynikh Krayova zavdan'. *Komp'yuterni zasoby, merezhi ta systemy*. **14**, 16–23.
13. Oliynyk, A. O., Subbotin, S. O., & Oliynyk, O. O. (2010). Evolyutsiyni obchyslennya ta prohramuvannya. Zaporizhzhya: ZNTU.
14. Kozyn, I. V. (2019). Evolyutsiyni modeli v dyskretnoyi optymizatsiyi. Zaporizhzhya: ZNU.

Чопорова Оксана Володимирівна – аспірант кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету, e-mail: o.choporova@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3167-7869.

Лісняк Андрій Олександрович – к.ф.-м.н., доцент, завідувач кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету, e-mail: andrey.lisnyak@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9669-7858.

УДК 539.3

Н.О. ЯРЕЦЬКА, А.О. РАМСЬКИЙ
Хмельницький національний університет

ВПЛИВ ПОЧАТКОВИХ НАПРУЖЕНЬ НА КОНТАКТНУ ВЗАЄМОДІЮ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ЦІЛЬЦЕВОГО ШТАМПА ТА ПІВПРОСТОРУ

Стаття присвячена дослідженню впливу початкових напружень на контактну взаємодію попередньо напруженого кільцевого штампа та півпростору з початковими (залишковими) напруженнями без урахування сил тертя. Дослідження представлено в загальній формі для теорії великих початкових (кінцевих) деформацій та двох варіантів теорії малих початкових деформацій в рамках лінеаризованої теорії пружності для довільної структури пружного потенціалу.

Робиться припущення, що початкові стани пружного кільцевого штампа та пружного півпростору залишаються однорідними та рівними. Дослідження проводиться за допомогою координат у початковому деформованому стані, які пов'язані з лагранжевими координатами (що відповідають природному стану). Крім того, вплив пружного кільцевого штампа викликає невеликі збурення основного пружного деформованого стану.

Також передбачається, що пружний кільцевий штамп та пружний півпростір виготовлені з різних ізотропних, трансверсально-ізотропних або композиційних матеріалів.

Числовий аналіз представлений у вигляді графіків для пружного потенціалу найпростішої структури для ізотропного стисливого тіла та відповідає квадратичному наближенню при використанні алгебраїчних інваріантів тензора деформацій Гріна. Алгоритм розв'язку цієї задачі реалізується у вигляді комп'ютерної програми у пакеті Maple 15.

Досліджено вплив початкового напруження на контактну взаємодію між пружним кільцевим штампом та пружним півпростором у випадку пружного потенціалу конкретної структури.

Актуальність проведених досліджень полягає в тому, що врахування впливу початкових (залишкових) напружень у тілах на закон розподілу контактних характеристик пружних тіл у точках їх взаємодії може дозволяти ефективніше враховувати, зносостійкість матеріалів, правильно оцінюючи їх запаси міцності. Також це може в достатній мірі знизити витрату матеріалів, зберігаючи їх необхідні функціональні характеристики.

Отже, вплив початкових (залишкових) напружень є суттєвим і його слід враховувати при розрахунку міцності в конструкціях і деталях машин.

Ключові слова: лінеаризована теорія пружності; початкові (залишкові напруження); контактна задача; кільцевий штамп; півпростір.

Н.А. ЯРЕЦКАЯ, А.А. РАМСКИЙ
Хмельницкий национальный университет

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ КОЛЬЦЕВОГО ШТАМПА И ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Статья посвящена исследованию влияния начальных напряжений на контактное взаимодействие предварительно напряженного кольцевого штампа и полупространства с начальными (остаточными) напряжениями без учета сил трения.

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.28

Исследование представлено в общей форме для теории больших начальных (конечных) деформаций и двух вариантов теории малых начальных деформаций в рамках линеаризованной теории упругости для произвольной структуры упругого потенциала.

Делается предположение, что начальные состояния упругого кольцевого штампа и упругого полупространства остаются однородными и равными. Исследование проводится с помощью координат в начальном деформированном состоянии, которые связаны с лагранжевыми координатами (естественного состояния). Кроме того, влияние кольцевого штампа вызывает небольшие возмущения основного упругого деформированного состояния.

Также предполагается, что упругий кольцевой штамп и упругое полупространство изготовлены из различных изотропных, трансверсально-изотропных или композиционных материалов.

Численный анализ представлен в виде графиков для упругого потенциала простейшей структуры для изотропного сжимаемого тела и отвечает квадратичному приближению при использовании алгебраических инвариантов тензора деформаций Грина. Алгоритм решения этой задачи реализуется в виде компьютерной программы пакета Maple 15.

Исследовано влияние начального напряжения на контактное взаимодействие между упругим кольцевым штампом и упругим полупространством в случае потенциалов конкретной структуры.

Актуальность проведенных исследований заключается в том, что учет влияния начальных (остаточных) напряжений в телах на закон распределения контактных характеристик упругих тел в точках их взаимодействия может позволять эффективно учитывать, износостойкость материалов, правильно оценивая их запасы прочности. Также это может в достаточной мере снизить расход материалов, сохраняя их необходимые функциональные характеристики.

Следовательно, влияние начальных (остаточных) напряжений является существенным и его следует учитывать при расчете прочности в конструкциях и деталях машин.

Ключевые слова: линеаризованная теория упругости; начальные (остаточные) напряжения; контактная задача; кольцевой штамп; полупространство.

N.O. YARETSKA, A.O. RAMSKY
Khmelnitsky National University

INFLUENCE OF INITIAL STRESSES ON CONTACT INTERACTION OF PRE-STRESSED ANNULAR STAMP AND HALF SPACE

The article is devoted to the study of the contact interaction of a pre-stressed annular stamp and a half-space with initial stresses without taking friction forces into account. The study is presented in a general form for the theory of large initial (finite) deformations and two versions of the theory of small initial deformations in the framework of the linearized theory of elasticity for an arbitrary structure of the elastic potential.

There is assumed that the initial states of the elastic annular stamp and the elastic half-space remain homogeneous and equal. The study is carried out in the coordinates of the initial deformed state, which are interrelated with Lagrange coordinates (natural state). In addition, the influence of the annular stamp causes small perturbations of the basic elastic deformed state.

Also, it is assumed that the elastic annular stamp and the elastic half-space are made of different isotropic, transversal-isotropic or composite materials.

Numerical analysis is presented in the form of graphs for the elastic potential of the simplest structure for an isotropic compressible body and corresponds to the quadratic approximation using algebraic invariants of the Green's strain tensor. The algorithm for solving this problem is implemented in the form of a computer program in the Maple 15 package

The influence of the initial stress on the contact interaction between the elastic annular stamp and the elastic half-space of the potentials of a particular structure is investigated.

The value of the studies carried out is that taking into account the influence of the initial (residual) stresses in the bodies on the law of distribution of the contact characteristics of elastic bodies at the points of their interaction can allow us to take into account, more effectively, the wear resistance of materials by properly estimating their strength reserves. Also, it can sufficiently reduce their material consumption, while retaining the necessary functional characteristics of materials.

Consequently, the observed effect of the initial (residual) stresses is significant and must be taken into account when calculating the strength in structural details.

Keywords: the linearized elasticity theory; initial (residual) stresses; contact problem; annular punch; half-space.

Постановка проблеми

Вплив початкових напружень на контактну взаємодію пружних тіл є одним із важливих факторів, які діють на розподіл напружень та переміщень. Початкові напруження практично завжди присутні в реальних конструкціях і деталях машин, тому розробка ефективних методів розрахунку напружено-деформованого стану з врахуванням початкових деформацій є актуальною і важливою науково-технічною проблемою.

Особливу зацікавленість у зв'язку із впровадженням у виробництво нових штучних матеріалів, які можуть витримувати великі початкові деформації, викликає дослідження контактних задач для попередньо напружених тіл. Таким чином, механіка композиційних матеріалів, сейсмологія, механіка матеріалів і елементів конструкцій, геофізика, механіка гірських порід, руйнівні методи визначення напружень, біомеханіка і ряд інших - далеко неповний перелік наукових напрямків фундаментального і прикладного характеру, в яких виникли проблеми, пов'язані з необхідністю дослідження впливу початкових напружень або деформацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Кількість публікацій з механіки контактної взаємодії безперервно збільшується, що пояснюється актуальністю розглянутих проблем для інженерної діяльності. Як наслідок отримані результати із широкого кола питань, що представлені працями [1–5]. Існує також ряд узагальнюючих публікацій [6], які повністю або частково пов'язані з тематикою даного дослідження.

Досить детальний огляд робіт пов'язаних із контактним тиском жорстких штампів (у тому числі і кільцевих) у разі відсутності початкових напружень наведено в монографіях [1–3].

Дослідження контактної взаємодії жорстких і пружних штампів із попередньо напруженими тілами представлені в [1–5]. Причому розглядаються або пружні потенціали конкретної структури, або завдання ставиться в загальному вигляді для

стислих (нестисливих) тіл із потенціалом довільної структури на основі лінеаризованої теорії пружності.

Вплив початкових напружень на контактну взаємодію жорсткого кільцевого штампа на пружний півпростір з початковими напруженнями представлено в роботі [7].

Мета дослідження

У рамках лінеаризованої теорії пружності для тіл з початковими напруженнями [1, 3] представити постановку та розв'язок задачі про тиск попередньо напруженого кільцевого штампа на півпростір з початковими напруженнями без урахування сил тертя. Дослідження виконати у загальному вигляді для стислих і нестисливих тіл для теорії великих початкових деформацій і двох варіантів теорії малих початкових деформацій при довільній структурі пружного потенціалу. Отримати числові та графічні результати досліджень для пружного потенціалу найпростішої структури для ізотропного стисливого тіла, що відповідає випадку нерівних коренів визначального рівняння [1], а також зробити висновки про вплив початкових напружень на контактну взаємодію тіл.

Викладення основного матеріалу дослідження

Нехай скінченний попередньо напружений кільцевої штамп з плоскою основою, геометрична вісь симетрії якого збігається з віссю u_3 циліндричної системи координат (r, θ, u_3) , спрямована усередину півпростору (рис.1) і тисне на півпростір з силою P , після виникнення там початкового деформованого стану. R_1, R_2 – внутрішній і зовнішній радіуси штампа, відповідно. Будемо вважати, що зовнішнє навантаження прикладене тільки до вільного торця пружного штампа. Під дією навантаження всі точки торця штампа переміщуються у напрямку осі симетрії u_3 на одну і ту ж величину ϵ . Будемо вважати, що поверхні поза областю контакту залишаються вільними від впливу зовнішніх сил, а у зоні контакту переміщення і напруження – неперервні.

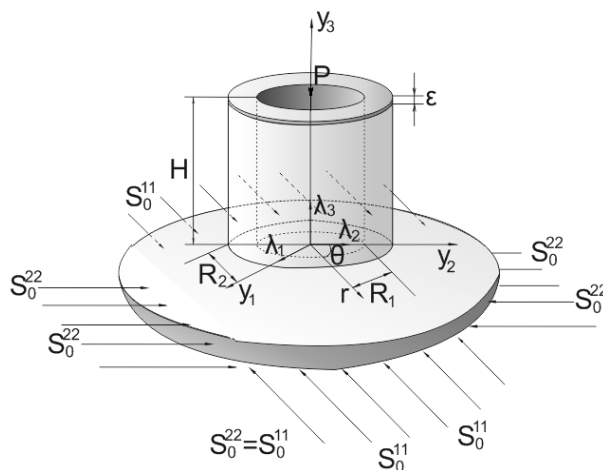


Рис. 1. Тиск пружного кільцевого штампа на пружний півпростір.

На рис. 1. λ_i ($i=1, 2, 3$) – коефіцієнти видовження, які визначають переміщення початкового стану, а S_0^{11}, S_0^{22} – компоненти симетричного тензора початкових напружень.

Припустимо, що початкові стани контактуючих тіл – однорідні та рівні, а пружні потенціали – двічі неперервно-диференційовані функції алгебраїчних інваріантів

тензора деформацій Гріна [1]. Матеріали тіл, вважаємо ізотропним стисливими або нестисливими з довільною структурою пружного потенціалу.

Нехай виконуються співвідношення [1]:

$$y_m = x_m + U_m^0, \quad U_m^0 = \delta_{mi} (\lambda_m - 1) \lambda_i^{-1} y_i \quad (i, m = \overline{1, 3}).$$

Тоді основне рівняння в переміщеннях [1] для стисливих тіл має вигляд

$$L'_{m\alpha} U_\alpha = 0, \quad L'_{m\alpha} = \omega'_{ij\alpha\beta} \partial^2 / \partial y_i \partial y_\beta, \quad (i, m, \alpha, \beta = \overline{1, 3}), \quad (1)$$

а для нестисливих тіл виконується умова нестисливості:

$$L'_{m\alpha} U_\alpha + q'_{am} \partial p' / \partial y_\alpha = 0, \quad L'_{m\alpha} = \kappa'_{im\alpha\beta} \partial^2 / \partial y_i \partial y_\beta, \quad (2)$$

$$q'_{ij} \partial U_j / \partial y_i = 0, \quad q'_{ij} = \lambda_i q_{ij}, \quad (i, j, m, \alpha, \beta = \overline{1, 3}).$$

Вирази для визначення складових тензора напружень для стислих і нестисливих тіл запишемо у вигляді:

$$Q'_{ij} = \omega'_{ij\alpha\beta} \frac{\partial U_\alpha}{\partial y_\beta}, \quad Q'_{ij} = \kappa'_{ij\alpha\beta} \frac{\partial U_\alpha}{\partial y_\beta} + q'_{ij} p, \quad \omega'_{ij\alpha\beta} = \frac{\lambda_i \lambda_\beta}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \omega_{ij\alpha\beta}, \quad \kappa'_{ij\alpha\beta} = \frac{\lambda_i \lambda_\beta}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} \kappa_{ij\alpha\beta}.$$

У випадку однорідних початкових деформаціях вважаємо, що виконується умова $S_0^{11} = S_0^{22} \neq 0$; $S_0^{33} = 0$; $\lambda_1 = \lambda_2 \neq \lambda_3$. При цьому розв'язок рівнянь (1), (2) представимо за допомогою функції χ , що задовольняє рівняння

$$(\Delta_1 + \xi_2'^2 \partial^2 / \partial y_3^2)(\Delta_1 + \xi_3'^2 \partial^2 / \partial y_3^2)\chi = 0, \quad (3)$$

де $\Delta_1 = \partial^2 / \partial r^2 + r^{-1} \partial / \partial r$.

В даній статті розглянемо випадок нерівних коренів характеристичного рівняння, яке відповідає рівнянню (3).

Запишемо граничні умови, що у системі циліндричних координат (r, θ, z_i) , де $z_i = v_i^{-1} y_3$, $v_i = \sqrt{n_i}$, $(i = 1, 2)$, $n_1 = \xi_2'^2$, $n_2 = \xi_3'^2$ відповідають даній постановці задачі:

$$U_3^{(1)} = -\varepsilon, \quad Q_{3r}^{(1)} = 0 \quad (R_1 < r < R_2), \quad z_1 = H v_1^{-1}, \quad (4)$$

$$U_3^{(1)} = U_3^{(2)}; \quad \tilde{Q}_{33}^{(1)} = \tilde{Q}_{33}^{(2)}; \quad \tilde{Q}_{3r}^{(1)} = \tilde{Q}_{3r}^{(2)} = 0 \quad (R_1 < r < R_2), \quad z_i = 0 \quad (i = 1, 2), \quad (5)$$

$$\tilde{Q}_{33}^{(2)} = 0, \quad \tilde{Q}_{3r}^{(2)} = 0 \quad (0 < r < R_1 \quad R_2 < r < \infty), \quad z_2 = 0, \quad (6)$$

$$\tilde{Q}_{rr}^{(1)} = 0, \quad \tilde{Q}_{3r}^{(1)} = 0 \quad (0 \leq z_i \leq H v_i^{-1}), \quad r = R_1, \quad r = R_2. \quad (7)$$

Умова рівноваги, що визначає зв'язок між осадом торця та рівнодіючим навантаженням P має вигляд:

$$P = -2\pi \int_{R_1}^{R_2} r Q_{33}^{(2)}(0, r) dr. \quad (8)$$

Для визначення напружено-деформованого стану в пружному кільцевому штампі з початковими напруженнями використовуємо лінеаризовані рівняння (1) – (3). З цих рівнянь слідує вирази для компонентів вектора переміщення та тензора

напруження для стислих і нестисливих тіл. Тоді загальний розв'язок $\chi = \chi_1 + \chi_2$ приймемо у вигляді

$$\begin{aligned} \chi_1 &= 0.25\varepsilon\theta_8^{-1}(r^2 - 2z_1^2) + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \tilde{C}_0^{(k)} \left[(3H\theta_6\theta_8^{-1} + z_1)(r^2 - 2z_1^2) + 2z_1r^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. + \tilde{A}_k I_0(\gamma_k v_1 r) \sin(\gamma_k v_1 z_1) + J_0(\alpha_k r) \tilde{S}_2(\alpha_k z_1) \right\} M_k, \\ \chi_2 &= 0.25\varepsilon\theta_8^{-1}(r^2 - 2z_2^2) + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \tilde{C}_0^{(k)} \left[(3H\theta_6\theta_8^{-1} + z_2)(r^2 - 2z_2^2) + 2z_2r^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. + \tilde{B}_k I_0(\gamma_k v_2 r) \sin(\gamma_k v_2 z_2) + J_0(\alpha_k r) \tilde{S}_3(\alpha_k z_2) \right\} M_k, \end{aligned}$$

де α_k, γ_k – власні значення задачі (4) – (7), $\theta_8 = m_1 n_1^{-1} + m_2 n_2^{-1}$,

$$\tilde{S}_2 = \tilde{E}_k sh(\alpha_k H v_1^{-1}) - \frac{s_0 n_1}{n_2} ch(\alpha_k H v_1^{-1}), \quad \tilde{S}_3 = \tilde{N}_k sh(\alpha_k H v_2^{-1}) - ch(\alpha_k H v_2^{-1}), \quad \tilde{A}_k = -\frac{s_0 I_1(\gamma_k v_2 R_2)}{I_1(\gamma_k v_1 R_1)},$$

$$\tilde{C}_0^{(k)} = -\frac{1}{6n_2\theta_7} J_0(\mu_k) \theta_{10}, \quad \theta_{10} = (\tilde{c}_1 - \tilde{c}_0) v_1 s_0 - (\tilde{c}_2 - \tilde{c}_0) v_2,$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}_k &= \frac{J_0(\mu_k)}{n_2 \alpha_k} \left\{ (\tilde{c}_1 - \tilde{c}_0) s_0 \left[cth(\alpha_k H v_1^{-1})(v_1 + H sh(\alpha_k H v_1^{-1}) - v_1 ch(\alpha_k H v_1^{-1})) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \alpha_k H ch(\alpha_k H v_1^{-1}) + v_1 sh(\alpha_k H v_1^{-1}) - 0.5 H^2 \alpha_k v_1^{-1} \right] + (\tilde{c}_2 - \tilde{c}_0) \left[\alpha_k H ch(\alpha_k H v_2^{-1}) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - v_2 sh(\alpha_k H v_2^{-1}) + 0.5 H \alpha_k (1 - \alpha_k cth(\alpha_k H v_2^{-1})) \right] \right\}, \quad \theta_6 = m_1 v_1^{-3} + m_2 v_2^{-3}, \\ \theta_7 &= (1 + \tilde{c}_0 - 2\tilde{c}_1) v_1^{-1} + (1 + \tilde{c}_0 - 2\tilde{c}_2) v_2^{-1}. \end{aligned}$$

Тоді напружено-деформований стан в попередньо напруженому кільцевому штампі для стислих (нестисливих) тіл та нерівних коренів, з урахуванням (4) – (7), представимо у вигляді

$$\begin{aligned} U_r^{(1)} &= -\sum_{k=1}^{\infty} \left\{ 6\tilde{C}_0^{(k)} r \theta_+ + \gamma_k^2 \left[v_1 \tilde{A}_k I_1(v_1 \gamma_k r) \cos(\gamma_k v_1 z_1) + \tilde{B}_k v_2 I_1(v_2 \gamma_k r) \cos(\gamma_k v_2 z_2) \right] - \right. \\ &\quad \left. - \alpha_k^2 J_1(\alpha_k r) \left(v_1^{-1} \tilde{S}_4(\alpha_k z_1) + v_2^{-1} \tilde{S}_5(\alpha_k z_2) \right) \right\} M_k, \\ U_3^{(1)} &= -2\varepsilon + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ 12\tilde{C}_0^{(k)} (m_1 z_1 n_1^{-1} + m_2 z_2 n_2^{-1} - H\theta_6) + \right. \\ &\quad \left. + \gamma_k^2 \left[\tilde{A}_k m_1 I_0(\gamma_k v_1 r) \sin(\gamma_k v_1 z_1) + \tilde{B}_k m_2 I_0(\gamma_k v_2 r) \sin(\gamma_k v_2 z_2) \right] - \right. \\ &\quad \left. - \alpha_k^2 J_0(\alpha_k r) \left[m_1 n_1^{-1} \tilde{S}_2(\alpha_k z_1) + m_2 n_2^{-1} \tilde{S}_3(\alpha_k z_2) \right] \right\} M_k, \\ Q_{33}^{(1)} &= C_{44} (1 + m_1) l_1 \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ 12\tilde{C}_0^{(k)} \left[v_1^{-1} + s v_2^{-1} \right] + \gamma_k^3 \left[\tilde{A}_k n_1 I_0(\gamma_k v_1 r) \cos(\gamma_k v_1 z_1) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + s n_2 \tilde{B}_k I_0(\gamma_k v_2 r) \cos(\gamma_k v_2 z_2) \right] - \alpha_k^3 J_0(\alpha_k r) \left[\tilde{S}_4(\alpha_k z_1) v_1^{-1} + s \tilde{S}_5(\alpha_k z_2) v_2^{-1} \right] \right\} M_k, \\ Q_{3r}^{(1)} &= C_{44} (1 + m_1) \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \gamma_k^3 \left[\tilde{A}_k v_1 I_1(\gamma_k v_1 r) \sin(\gamma_k v_1 z_1) + s_0 v_2 \tilde{B}_k I_1(\gamma_k v_2 r) \sin(\gamma_k v_2 z_2) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \alpha_k^3 v_1^{-1} J_1(\alpha_k r) \left(n_1^{-1} \tilde{S}_2(\alpha_k z_1) + s_0 n_2^{-1} \tilde{S}_3(\alpha_k z_1) \right) \right\} M_k, \end{aligned} \tag{9}$$

де
$$\tilde{S}_4 = \frac{n_1 s_0}{n_2} \left[\text{cth}(\alpha_k H v_1^{-1}) \text{ch}(\alpha_k z_1) - \text{sh}(\alpha_k z_1) \right], \quad \tilde{S}_5 = \text{sh}(\alpha_k z_2) - \text{cth}(\alpha_k H v_2^{-1}),$$

$$\tilde{E}_k = \frac{n_1 s_0}{n_2} \text{cth}(\alpha_k H v_1^{-1}), \quad \tilde{N}_k = -\text{cth}(\alpha_k H v_2^{-1}), \quad \theta_+ = v_2^{-1} + 2 v_1^{-1}, \quad J_\nu(x), \quad I_\nu(x) \quad - \text{ функції}$$

Бесселя, значення $D_{44}, C_{44}, I_1, I_2, m_1, m_2, s_0$ визначаються із [1].

Напружено-деформований стан в попередньо напруженому півпросторі з урахуванням (4)–(7) і $z_1 = 0$, представимо у вигляді [1, 7]

$$Q_{33}^{(2)} = \frac{\omega_3}{R_2 - R_1} \int_0^\infty F(\eta) J_0(\eta r) d\eta, \quad U_3^{(2)} = -\frac{1}{\omega_3} \int_0^\infty \frac{F(\eta)}{\eta} J_0(\eta r) d\eta, \quad U_r^{(2)} = \omega_1 \int_0^\infty \frac{F(\eta)}{\eta} J_1(\eta r) d\eta, \quad (10)$$

де $\omega_3 = c_{44} I_1 (1 + m_1) (s - s_0)$, $\omega_1 = s_0 - 1$, $s = s_0 I_2 I_1^{-1}$, $F(\eta)$ – невідома функція.

Використовуючи розв’язок для штампа (9) і задовольняючи другій умові (4), другій умові (7), знаходимо власні значення задачі (4) – (7) для $n_1 \neq n_2$:

$$\gamma_k = \frac{\pi(2k+1)}{H}, \quad \alpha_k = \frac{\mu_k}{R_1} \quad (J_1(\mu_k) = 0).$$

Враховавши перші умови (5) і (6), визначимо невідому функцію $F(\eta)$ для (10) із парних інтегральних рівнянь:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \frac{F(\eta)}{\eta} J_0(\eta r) d\eta &= f(r) \quad (R_1 < r < R_2), \\ \int_0^\infty F(\eta) J_0(\eta r) d\eta &= 0 \quad (0 < r < R_1, R_2 < r < \infty), \end{aligned} \quad (11)$$

де $f(r) = \omega_2 \left(\varepsilon - \frac{2H\theta_6\theta_{10}}{n_2\theta_7} \sum_{k=1}^\infty J_0(\mu_k) M_k + \frac{m_1 s_0 - m_2}{n_2} \sum_{k=1}^\infty \alpha_k^2 J_0(\alpha_k r) M_k \right).$

Застосування формули звернення до (11) приводить її до співвідношення для функції $F(\eta)$, тобто

$$\frac{F(\eta)}{\eta} = \frac{2\omega_2}{\pi} \left\langle \varepsilon \psi(\eta, 0) - \frac{2H\theta_6\theta_{10}}{n_2\theta_7} \sum_{k=1}^\infty \left[J_0(\mu_k) \psi(\eta, 0) + (m_1 s_0 - m_2) R n_2^{-1} \alpha_k^2 \psi(\eta, \mu_k) \right] M_k \right\rangle \quad (12)$$

$$\left(\psi(x, y) = \frac{x \sin x \cos y - y \sin y \cos x}{x^2 - y^2}, \quad \psi(x, 0) = \frac{\sin x}{x} \right).$$

Враховавши другу граничну умову (5), маємо

$$\int_0^\infty F(\eta) \int_{R_1}^{R_2} r J_0(\mu_n r) J_0(\eta r) dr d\eta = \frac{R_2 - R_1}{s - s_3} \left\langle -\frac{2\theta_{10}}{\theta_7} \left(\frac{1}{v_1} - \frac{s}{v_2} \right) \sum_{k=1}^\infty J_0(\mu_k) \tilde{g}_k M_k + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \gamma_k^3 \left[\tilde{A}_k n_1 t_{kn}^{(1)} + s n_2 t_{kn}^{(2)} \right] \tilde{B}_k - \frac{\alpha_k}{v_2} \tau_{kn} \left[\frac{v_1 s_0}{v_2} \operatorname{cth} \left(\frac{\alpha_k H}{v_1} \right) - s \cdot \operatorname{cth} \left(\frac{\alpha_k H}{v_2} \right) \right] \right\} M_n \Bigg\} \\
 & \left(\tilde{g}_k = [R_2 J_1(\mu_k R_2) - R_1 J_1(\mu_k R_1)] \mu_k^{-1}, \right. \\
 & t_{kn}^{(i)} = [R_2 I_0(\gamma_k v_i R_2) \mu_n J_1(\mu_n R_2) + R_2 I_1(\gamma_k v_i R_2) \gamma_k v_i J_0(\mu_n R_2) - \\
 & - R_1 I_0(\gamma_k v_i R_1) \mu_n J_1(\mu_n R_1) - R_1 I_1(\gamma_k v_i R_1) \gamma_k v_i J_0(\mu_n R_1)] (v_i^2 \gamma_k^2 + \mu_n^2)^{-1}, \\
 & \tau_{kn} = [R_1 J_1(\mu_n R_1) \mu_n J_0(\mu_k R_1) + R_2 J_1(\mu_k R_2) \mu_k J_0(\mu_n R_2) - \\
 & - R_1 J_1(\mu_k R_1) \mu_k J_0(\mu_n R_1) - R_2 J_1(\mu_n R_2) \mu_n J_0(\mu_k R_2)] (\mu_k^2 + \mu_n^2)^{-1} \Big).
 \end{aligned}$$

Задовольнивши перші дві граничні умови (5), з урахуванням ортогональності Беселевих функцій $J_0(\mu_k r)$ для визначення сталих M_i ($i = 0, 1, 2, \dots$), які входять в (9) - (11), отримаємо нескінченну систему алгебраїчних рівнянь:

$$a_k M_k + \sum_{n=1}^{\infty} a_{kn} M_n = \beta_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \tag{13}$$

Коефіцієнти системи мають вигляд

$$\begin{aligned}
 \beta_0 &= -\frac{2\omega_2 \varepsilon}{\pi}, \quad \beta_k = \frac{2\omega_2}{\pi} \left(\frac{\alpha_k^2 (1 + m_2) m_1}{n_2} - \varepsilon \right) \psi(0, \alpha_k), \quad a_0 = 0, \\
 a_k &= \frac{4\omega_2 H \theta_6 \theta_{10}}{\pi \theta_7 n_2} J_0(\mu_k) \psi(0, \mu_k) - \frac{2\theta_{10} (R_2 - R_1)}{(s - s_3) \theta_7} (v_1^{-1} - \\
 & - s v_2^{-1}) J_0(\mu_k) \mu_k^{-1} (R_2 J_1(\mu_k R_2) - R_1 J_1(\mu_k R_1)), \\
 a_{kn} &= \frac{R_2 - R_1}{s - s_3} \left(\gamma_k^3 [\tilde{A}_k n_1 t_{kn}^{(1)} + s n_2 t_{kn}^{(2)}] \tilde{B}_n - \alpha_k^3 v_2^{-1} [v_1 v_2^{-1} s_0 \operatorname{cth}(\alpha_k H v_1^{-1}) - \right. \\
 & \left. - s \cdot \operatorname{cth}(\alpha_k H v_2^{-1})] \tau_{kn} + 2(m_2 - m_1 s_0) (n_2 \pi)^{-1} \alpha_k^2 \psi(\mu_n, \mu_k), \right. \\
 a_{n0} &= \frac{4\omega_2 H \theta_6 \theta_{10}}{\pi \theta_7 n_2} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) J_0(\mu_n) + \frac{2\omega_2 (m_2 - m_1 s_0)}{n_2 \pi} \alpha_k^2 \psi(0, \mu_n) - \\
 & - \frac{\omega_3}{s - s_0} \left\{ \frac{\theta_{10}}{\theta_7 n_2} \left(\frac{1}{v_1} + \frac{s}{v_2} \right) J_0(\mu_n) (R_2^2 - R_1^2) + \gamma_n^2 (\tilde{A}_n v_1 + s v_2) [R_2 I_1(\gamma_n R_2 v_2) - \right. \\
 & \left. - R_1 I_1(\gamma_n R_1 v_1)] \tilde{B}_n - \alpha_k^2 n_2^{-1} [R_2 J_1(\alpha_n R_2) - R_1 J_1(\alpha_n R_1)] [v_1 s_0 \operatorname{cth}(\alpha_k H v_1^{-1}) - s v_2 \operatorname{cth}(\alpha_k H v_2^{-1})] \right\}.
 \end{aligned}$$

Використовуючи умову рівноваги (8), встановимо зв'язок між осадом торця та рівнодіючим навантаженням P у вигляді

$$P = 4\varepsilon \omega_2^2 (R_2 - R_1)^{-1} ((1 - R_2^2)^{-0.5} - (1 - R_1^2)^{-0.5}).$$

Визначивши невідомі сталі M_i ($i = 0, 1, 2, \dots$) із системи (13), можна обчислити контактні характеристики як у пружному штампі, так і у пружному півпросторі за формулами (9) – (10). В результаті цього, розв'язок представимо у вигляді рядів через нескінченну систему констант, що визначається із (13). Зауважимо, що в (13) коефіцієнти β_k і a_{kn} залежать від величин, що визначають структуру пружного

потенціалу та висоту пружного штампа H , а вільні члени залежать тільки від n_1, n_2 .

В роботі проведено чисельний розв'язок системи (13) методом редукції для пружного потенціалу найпростішої структури для ізотропного стисливого тіла, що відповідає квадратичному наближенню при використанні алгебраїчних інваріантів тензора деформацій Гріна у формі [ф-ла 1.46, 1] та таких значеннях параметрів: $R_2 R_1^{-1} = 2$, $\varepsilon = 10^{-4}$, $\lambda_1 = 0.7; 0.8; 0.9; 1; 1.1; 1.2; 1.3$, де $0 \leq \rho \leq 1$, $\rho = (r - R_1)(R_2 - R_1)^{-1}$. Алгоритм розв'язку реалізовано у Maple 15.

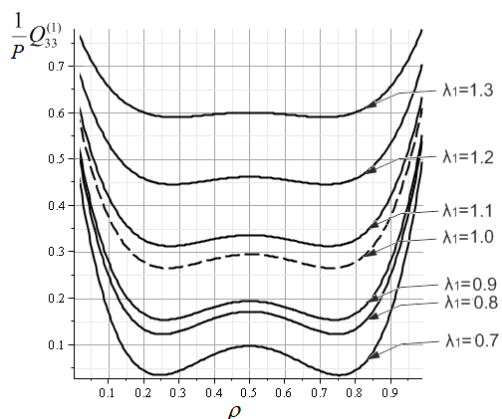


Рис. 2. Контактні напруження $Q_{33}^{(1)}$.

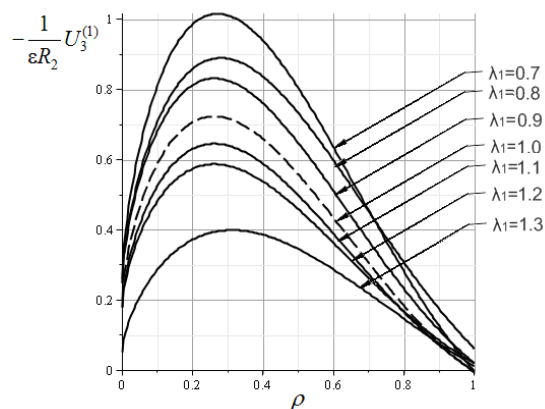


Рис. 3. Контактні переміщення $U_3^{(1)}$.

На рис. 2, 3 представлено розподіли нормальних контактних напружень $P^{-1}Q_{33}^{(1)}$ та переміщень $-(\varepsilon R_2)^{-1}U_3^{(1)}$ під кільцевим штампом в зоні контакту у безрозмірних координатах. Причому, початок координат по осі ρ відповідають значенню $r = R_1$. Пунктирні криві відповідають випадку відсутності початкових напружень ($\lambda_1=1$), а суцільні – з початковими напруженнями.

Висновки

На підставі проведеного чисельного аналізу можна стверджувати, що при постійному зовнішньому навантаженні початкові (залишкові) напруження істотно впливають на основні контактні характеристики (особливо для нестисливих тіл). Крім цього, даний вплив полягає у тому, що: початкові напруження у півпросторі та штампі зменшуються у випадку стиску ($\lambda_1 < 1$) та збільшуються при розтягуванні ($\lambda_1 > 1$), що видно із рис. 2; при стисканні ($\lambda_1 < 1$) початкові напруження у півпросторі та штампі призводять до збільшення переміщень по абсолютній величині, а у випадку розтягування ($\lambda_1 > 1$) – до їх зменшення, що видно із рис. 3.

Таким чином, отримані результати з урахуванням попередньо напруженого стану при контактній взаємодії пружного штампа і пружного півпростору можуть бути використані для регулювання контактних напружень і переміщень при розрахунках конструкцій та деталей машин на міцність.

Список використаної літератури

1. Гузь А. Н, Рудницький В. Б. Основы теории контактного взаимодействия упругих тел с начальными (остаточными) напряжениями : монографія. Хмельницький: вид. ПП Мельник, 2006. 710 с.
2. Грилицкий Д. В., Кизыма Я. М. Осесимметричные контактные задачи теории упругости и термоупругости. Львов : Вища шк., 1981. 136 с.

3. Гузь А. Н., Бабич С. Ю., Глухов Ю. П. Смешанные задачи для упругого основания с начальными напряжениями. Германия : Saarbrücken LAPLAMBERT Academic Publishing, 2015. 468 с.
4. Babich. S. Yu., Dikhtyaruk N. N., Degtyar S. V. Contact Problem for Two Identical Strips Reinforced by Periodically Arranged Fasteners with Initial Stresses. *International Applied Mechanics*. 2019. Vol. 55. № 6. P. 629–635.
5. Yaretskaya N. A. Three-Dimensional Contact Problem for an Elastic Layer and a Cylindrical Punch with Prestresses. *International Applied Mechanics*. 2014. Vol. 50. № 4. P. 378–388.
6. Гузь А. Н., Бабич С. Ю., Рудницкий В. Б. Контактное взаимодействие упругих тел с начальными (остаточными) напряжениями. *Развитие идей Л.А. Галина в механике*. 2013. 480 с.
7. 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.

References

1. Guz, A. N, & Rudnitskiy, V. B. (2006). *Osnovyi teorii kontaktnogo vzaimodeystviya uprugih tel s nachalnymi (ostatochnymi) napryazheniyami* : monografiya. Hmel'nitskiy: vid. PP Melnik.
2. Grilitskiy, D. V., & Kizyima, Ya. M. (1981). *Osesimmetrichnyie kontaktnyie zadachi teorii uprugosti i termouprugosti*. Lvov : Vischa shk.
3. Guz, A. N., Babich, S. Yu., & Gluhov, Yu. P. (2015). *Smeshannyye zadachi dlya uprugogo osnovaniya s nachalnymi napryazheniyami*. Germaniya: Saarbrücken LAPLAMBERT Academic Publishing.
4. Babich, S. Yu., Dikhtyaruk, N. N., & Degtyar, S. V. (2019). Contact Problem for Two Identical Strips Reinforced by Periodically Arranged Fasteners with Initial Stresses. *International Applied Mechanics*. **55**, 6, 629–635.
5. Yaretskaya, N. A. (2014) Three-Dimensional Contact Problem for an Elastic Layer and a Cylindrical Punch with Prestresses. *International Applied Mechanics*. **50**, 4, 378–388.
6. Guz, A. N., Babich, S. Yu., & Rudnitskiy, V. B. (2013). *Kontaktное взаимодействие упругих тел с начальными (остаточными) напряжениями*. *Razvitie idey L.A. Galina v mehanike*.
7. Yaretskaya, N. F. (2018). Contact Problem for the Rigid Ring Stamp and the Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*. **54**, 5, 539–543.

Ярецька Наталія Олександрівна – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої математики та комп'ютерних застосувань Хмельницького національного університету, e-mail: massacran2@ukr.net, 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.

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ
до наукового журналу
«Прикладні питання математичного моделювання»**

Параметри файлу:

Рукопис повинен бути підготовлений за допомогою Microsoft Word-2003/2016; **формат сторінки** – А4, **орієнтація сторінки** – "книжкова"; **границі**: ліва – 2,5 см; права – 2,5 см; верхня – 2,5 см; нижня – 2,5 см; **інтервал між рядками** – 1,0; **інтервал між абзацами** "до", "після" – 0 пт.; **відступи** "ліворуч", "праворуч" – 0 пт.; **відступ першого рядка** – 1,25 см.

Обов'язкові елементи статті:

УВАГА! Блок «Відомості про авторів», «Назва статті», «Анотація» та «Перелік ключових слів» подається ТРЬОМА мовами (українською, англійською, російською) послідовно з однаковим форматкуванням.
Перша анотація подається мовою статті.
Текст анотацій всіма трьома мовами має бути ідентичний.
Розмір кожної анотації не менше 1800 знаків без пробілів.

- **індекс УДК** у верхньому лівому куті сторінки (Times New Roman, 12 пт.), **вказується один раз**;
- **ініціали і прізвище автора (авторів)** великими літерами (Times New Roman, 12 пт., вирівнювання – по правому краю) (на англійську ПІБ авторів перекладається з української мови);
- **повна назва організації**, де працює автор (Times New Roman, 10 пт., по правому краю);
- *пустий рядок* (Times New Roman, 12 пт.);
- **назва статті** великими літерами, по центру (Times New Roman, 12 пт., жирний);
- *пустий рядок* (Times New Roman, 12 пт.);
- **анотація** (Times New Roman, 12 пт., курсив);
- **перелік ключових слів**, який починається зі слів: "Ключові слова:" (або "Ключевые слова:", "Keywords:") (Times New Roman, 12 пт., курсив);
- *пустий рядок* (Times New Roman, 12 пт.).

Викладення основного матеріалу дослідження

Основний текст статті (Times New Roman, 12 пт.), який, у відповідності до вимог МОН України, обов'язково повинен містити такі виділені елементи:

- Постановка проблеми;
- Аналіз останніх досліджень і публікацій;
- Мета дослідження;
- Викладення основного матеріалу дослідження;
- Висновки;
- Список використаної літератури;
- References.
- **інформацію про авторів (див. Зразок оформлення статті).**

Додаткові вимоги до елементів статті:

- **Рисунки**: підписи під рисунками – Times New Roman, 10 пт., жирний;
- **Формули**: для набору використовувати редактор формул Microsoft Equation 3.0 або MathType; формули по центру; нумерація формул – по правому краю;
Розміри формул за замовчуванням: звичайний символ – 12 пт; великий індекс – 7 пт; маленький індекс – 5 пт; великий символ – 18 пт; маленький символ – 12 пт.
- **Програми**: для набору фрагментів використовувати шрифти Courier New (Courier);
- **Список літератури**: оформлюється у відповідності до вимог ДСТУ 8302:2015 "Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання"; (<http://lib.pu.if.ua/files/dstu-8302-2015.pdf>);
- **References**: оформлюються за правилами транслітерації англійською мовою з української/російської мов.

Для транслітерації пропонуємо скористатися наступними ресурсами:

- транслітерація з російської мови: <http://translate.meta.ua/ru/translit/>
- транслітерація з української мови: <http://ukrlit.org/transliteratsiia>

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

(Зразок складено з уривків окремих публікацій, автори є вигаданими особами)

УДК XXX.XX

В.В. КРАВЧЕНКО, С.В. ОНОПЕНКО
Херсонський національний технічний університет
О.І. КОВАЛЕНКО
Херсонський державний університет

ВЛАСТИВОСТІ ПРОЦЕДУРИ ПОБУДОВИ РОЗКЛАДУ

Розглянуті властивості процедури побудови розкладу, яка формалізує картковий метод ручної побудови розкладу. У загальній постановці вона є процесом упорядкування деякої скінченної множини подій в часі за умов ресурсних та інших обмежень...

Ключові слова: процедура побудови розкладу, картковий метод...

В.В. КРАВЧЕНКО, С.В. ОНОПЕНКО
Херсонский национальный технический университет
А.И. КОВАЛЕНКО
Херсонский государственный университет

СВОЙСТВА ПРОЦЕДУРЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЯ

Рассмотрены свойства процедуры построения расписания, которая формализует карточный метод ручного составления расписаний. В общей постановке она является процессом упорядочивания некоторого конечного множества событий во времени в условиях ресурсных и других ограничений ...

Ключевые слова: процедура построения расписания, карточный метод...

V.V. KRAVCHENKO, S.V. ONOPENKO
Kherson National Technical University
O.I. KOVALENKO
Kherson State University

THE PROPERTIES OF SCHEDULE CONSTRUCTION PROCEDURE

The properties of the schedule construction procedure, which formalizes the card method for manual scheduling, are considered. In the general formulation it is a process of ordering a certain finite set of events in time under resource and other constraints ...

Keywords: the schedule construction procedure, card method...

Постановка проблеми

Задача складання розкладу є однією з найбільш розповсюджених задач, які вирішує кожна людина практично кожний день. У загальній постановці вона є процесом упорядкування деякої скінченної множини подій в часі за умов ресурсних та інших обмежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз існуючих методів розв'язання задачі складання розкладу занять показує, що розв'язання задач теорії розкладів має відому складність. За змістом ці задачі відносяться до класу комбінаторних, для яких суттєве значення має розмірність...

Мета дослідження

Метою даного дослідження є автоматизація складання розкладу занять для системи дистанційного навчання з врахуванням завантаженості викладацького складу. Якість навчання, його економічна ефективність, зручність навчання студентів і роботи професорсько-викладацького складу залежить від вдало складеного розкладу.

...

Висновки

Під час виконання роботи було розроблено власний математичний метод для складання розкладу, а саме було визначено ряд обмежень, які враховуються при складанні розкладу, створено цільову функцію для оцінки придатності ...

Список використаної літератури

1. Мокін Б. І., Мокін В. Б., Мокін О. Б. Математичні методи ідентифікації динамічних систем. Вінниця : ВНТУ, 2010. 260 с.
2. Квасниця Г., Шинкаренко Г. Адаптивні апроксимації методу скінченних елементів для задач еластостатики. *Вісник Львівського університету. Серія: Прикладна математика та інформатика*. 2002. Вип. 5. С. 95–106.
3. Тимофієва Н. К. Один спосіб моделювання інтелекту людини з використанням комбінаторного аналізу. *Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту. (ISDMCI'2014): матеріали X Міжнародної наукової конференції (Залізний Порт, 1923 травня 2014 р.)*. Херсон, 2014. С. 180-182.
4. Тимофієва Н. К. Теоретико-числові методи розв'язання задач комбінаторної оптимізації: автореф. дис... д-ра. техн. наук. Київ, 2007. 32 с.

References

1. Mokin, B. I., Mokin, V. B., & Mokin, O. B. (2010). Matematychni metody identyfikatsii dynamichnykh system. Vinnytsia: VNTU.
2. Kvasnytsia, H., & Shynkarenko, H. (2002). Adaptivni aproksymatsii metodu skinchennykh elementiv dlia zadach elastostatyky. *Visnyk Lvivskoho universytetu. Seria: Prykladna matematyka ta informatyka*. 5, 95–106.
3. Tymofiiieva, N. K. (2014) Odyn sposib modeliuвання intelektu liudyny z vykorystanniam kombinatornoho analiz. Proceedings of the *Intelektualni systemy pryiniattia rishen ta problemy obchysliuvalnoho intelektu. (ISDMCI'2014) : materialy X Mizhnarodnoi naukovoї konferentsii*. (Ukraine, Zaliznyi Port, May 28-31, 2014), Kherson, pp. 180–182.
4. Tymofiiieva, N. K. (2007). Teoretyko-chyslovi metody rozv'язання zadach kombinatornoi optymizatsii. (Extended abstract of Doctor's thesis), Kyiv: In-t kibernetiky im. V.M. Hlushkova NAN Ukrainy.

Кравченко Віктор Вікторович – д.ф.-м.н., професор, професор кафедри математичного моделювання Херсонського національного технічного університету, e-mail: kravchenko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4107-8141.

Онопенко Сергій Васильович – аспірант кафедри технічної кібернетики Херсонського національного технічного університету, e-mail: onopenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5196-5301.

Коваленко Олександр Іванович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформатики Херсонського державного університету, e-mail: kovalenko@i.ua, ORCID: 0000-0002-6196-540.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ
для научного журнала
«Прикладные вопросы математического моделирования»

Параметры файла:

Рукопись должна быть подготовлена за помощью Microsoft Word-2003/2016; **формат страницы** – А4, **ориентация страницы** – "книжная"; **границы**: левая – 2,5 см; правая – 2,5 см; верхняя – 2,5 см; нижняя – 2,5 см; **интервал между строками** – 1,0; **интервал между абзацами** "до", "после" – 0 пт.; **отступы** "слева", "справа" – 0 пт.; **отступ первой строки** – 1,25 см.

Обязательные элементы статьи:

Внимание! Блок «Сведения об авторах», «Название статьи», «Аннотация» и «Список ключевых слов» представляется на ТРЕХ языках (украинском, английском, русском) последовательно с одинаковым форматированием.
Первая аннотация дается на языке статьи.
Текст аннотаций на всех трех языках должен быть идентичным.
Размер каждой аннотации – не меньше 1800 знаков без пробелов.

- **индекс УДК** в верхнем левом углу страницы (Times New Roman, 12 пт.), **указывается один раз**;
- **инициалы и фамилия автора (авторов)** большими буквами на языке статьи (Times New Roman, 12 пт., выравнивание – по правому краю) (на английский язык ФИО авторов переводится с украинского языка);
- **полное название организации**, где работает автор (Times New Roman, 10 пт., по правому краю);
- *пустая строка* (Times New Roman, 12 пт.);
- **название статьи** большими буквами, по центру (Times New Roman, 12 пт., жирный);
- *пустая строка* (Times New Roman, 12 пт.);
- **аннотация** (Times New Roman, 12 пт., курсив);
- **список ключевых слов**, который начинается со слов: "Ключевые слова:" (или "Ключові слова:") (Times New Roman, 12 пт., курсив);
- *пустая строка* (Times New Roman, 12 пт.);

Изложение основного материала исследования

Основной текст статьи (Times New Roman, 12 пт.), который, согласно требований МОН Украины, **обязательно** должен содержать такие выделенные элементы:

- Постановка проблемы;
- Анализ последних исследований и публикаций;
- Цель исследования;
- Изложение основного материала исследования;
- Выводы;
- Список использованной литературы;
- References.
- **информацию об авторах (см. Образец оформления статьи).**

Дополнительные требования к элементам статьи:

- **Рисунки**: подписи под рисунками – Times New Roman, 10 пт., жирный;
- **Формулы**: для набора использовать редактор формул Microsoft Equation 3.0 или MathType; формулы по центру; нумерация формул – по правому краю;
Размеры по умолчанию: обычный символ – 12 пт; большой индекс – 7 пт; маленький индекс – 5 пт; большой символ – 18 пт; маленький символ – 12 пт.
- **Программы**: для набора фрагментов использовать шрифты Courier New (Courier);
- **Список литературы**: оформляется согласно требований ДСТУ 8302:2015 "Информация и документация. Библиографические ссылки. Общие требования и правила составления"; (<http://lib.pu.if.ua/files/dstu-8302-2015.pdf>)
- **References**: оформляются по правилам транслитерации с украинского/русского языка на английский язык.
 - Для транслитерации предлагаем воспользоваться такими ресурсами:
 - транслитерация с русского языка: <http://translate.meta.ua/ru/translit/>
 - транслитерация с украинского языка: <http://ukrlit.org/transliteratsiia>

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

(Образец составлен из отрывков разных публикаций, авторы являются вымышленными личностями)

УДК XXX.XX

В.В. КРАВЧЕНКО, С.В. ОНОПЕНКО
Херсонский национальный технический университет
А.И. КОВАЛЕНКО
Херсонский государственный университет

СВОЙСТВА ПРОЦЕДУРЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЯ

Рассмотрены свойства процедуры построения расписания, которая формализует карточный метод ручного составления расписаний. В общей постановке она является процессом упорядочивания некоторого конечного множества событий во времени в условиях ресурсных и других ограничений ...

Ключевые слова: процедура построения расписания, карточный метод...

В.В. КРАВЧЕНКО, С.В. ОНОПЕНКО
Херсонський національний технічний університет
О.І. КОВАЛЕНКО
Херсонський державний університет

ВЛАСТИВОСТІ ПРОЦЕДУРИ ПОБУДОВИ РОЗКЛАДУ

Розглянуті властивості процедури побудови розкладу, яка формалізує картковий метод ручної побудови розкладу. У загальній постановці вона є процесом упорядкування деякої скінченної множини подій в часі за умов ресурсних та інших обмежень...

Ключові слова: процедура побудови розкладу, картковий метод...

V.V. KRAVCHENKO, S.V. ONOPENKO
Kherson National Technical University
O.I. KOVALENKO
Kherson State University

THE PROPERTIES OF SCHEDULE CONSTRUCTION PROCEDURE

The properties of the schedule construction procedure, which formalizes the card method for manual scheduling, are considered. In the general formulation it is a process of ordering a certain finite set of events in time under resource and other constraints ...

Keywords: the schedule construction procedure, card method...

Постановка проблемы

Задача составления расписания является одной из наиболее распространенных задач, которые решает каждый человек практически каждый день. В общей постановке она является процессом упорядочения некоторого конечного множества событий во времени в условиях ресурсных и других ограничений.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ существующих методов решения задачи составления расписания занятий показывает, что решение задач теории расписаний имеет известную сложность. По содержанию эти задачи относятся к классу комбинаторных, для которых существенное значение имеет размерность ...

Цель исследования

Целью данного исследования является автоматизация составления расписания занятий для системы дистанционного обучения с учетом загруженности преподавательского состава. Качество обучения, его экономическая эффективность, удобство обучения студентов и работы профессорско-преподавательского состава зависит от удачно составленного расписания.

...

Выводы

Во время выполнения работы был разработан собственный математический метод для составления расписания, а именно был определен ряд ограничений, которые учитываются при составлении расписания, создана целевая функция для оценки пригодности ...

Список использованной литературы

1. Мокін Б. І., Мокін В. Б., Мокін О. Б. Математичні методи ідентифікації динамічних систем. Вінниця : ВНТУ, 2010. 260 с.
2. Квасниця Г., Шинкаренко Г. Адаптивні апроксимації методу скінченних елементів для задач еластостатики. *Вісник Львівського університету. Серія: Прикладна математика та інформатика*. 2002. Вип. 5. С. 95–106.
3. Тимофієва Н. К. Один спосіб моделювання інтелекту людини з використанням комбінаторного аналізу. *Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту. (ISDMCF'2014): матеріали X Міжнародної наукової конференції (Залізний Порт, 1923 травня 2014 р.)*. Херсон, 2014. С. 180-182.
4. Тимофієва Н. К. Теоретико-числові методи розв'язання задач комбінаторної оптимізації: автореф. дис... д-ра. техн. наук. Київ, 2007. 32 с.

References

1. Mokin, B. I., Mokin, V. B., & Mokin, O. B. (2010). *Matematychni metody identyfikatsii dynamichnykh system*. Vinnytsia: VNTU.
2. Kvasnytsia, H., & Shynkarenko, H. (2002). *Adaptyvni aproksymatsii metodu skinchennykh elementiv dlia zadach elastostatyky. Visnyk Lvivskoho universytetu. Seria: Prykladna matematyka ta informatyka*. 5, 95–106.
3. Tymofiiieva, N. K. (2014) *Odyn sposib modeliuвання intelektu liudyny z vykorystanniam kombinatornoho analiz. Proceedings of the Intelektualni systemy pryiniattia rishen ta problemy obchysliuvalnoho intelektu. (ISDMCF'2014) : materialy X Mizhnarodnoi naukovoї konferentsii. (Ukraine, Zaliznyi Port, May 28-31, 2014), Kherson*, pp. 180–182.
4. Tymofiiieva, N. K. (2007). *Teoretyko-chyslovi metody rozv'iazannia zadach kombinatornoї optyimizatsii. (Extended abstract of Doctor's thesis)*, Kyiv: In-t kibernetiky im. V.M. Hlushkova NAN Ukrainy.

Кравченко Виктор Викторович – д.ф.-м.н., профессор. профессор кафедры математического моделирования Херсонского национального технического университета, e-mail: kravchenko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4107-8141.

Онопенко Сергей Васильевич – аспирант кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета, e-mail: onopenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5196-5301.

Коваленко Александр Иванович – к.т.н., доцент, доцент кафедры информатики Херсонского государственного университета, e-mail: kovalenko@i.ua, ORCID: 0000-0002-6196-540.

ARTICLE SUBMISSION GUIDELINES
for scientific journal
'Applied Questions of Mathematical Modelling'

File parameters:

The manuscript must be prepared with help of Microsoft Word-2003/2016; **page format** – A4, **page orientation** – "book"; **boundaries:** left – 2,5 cm; right – 2,5 cm; top – 2,5 cm; bottom – 2,5 cm; **line spacing** – 1,0; **interval between paragraphs** "before", "after" – 0 pt.; **ident** "left", "right" – 0 pt.; **ident of first line** – 1,25 cm.

Required elements of the article:

Attention! Unit 'Authors Details', 'Article Title', 'Abstract', and 'Keyword Lis't are presented in THREE languages (Ukrainian, English, Russian) in the same format.
The first abstract is given in the language of the article.
The text of the annotations in all three languages should be identical.
Annotation size is at least 1800 characters without spaces.

- **index UDK** in the top left corner of the page (Times New Roman, 12 pt.), **is specified once**;
- **the initials and surname of author (authors)** in capital letters by article language (Times New Roman, 12 pt., alignment – right-aligned) (The authors' full name is translated from Ukrainian into English);
- **full name of the organization**, in which author works (Times New Roman, 10 pt., right-aligned);
- *empty line* (Times New Roman, 12 pt.);
- **the title of the article** in capital letters, centered (Times New Roman, 12 pt., bold);
- *empty line* (Times New Roman, 12 pt.);
- **abstract** in article language no less than 500 symbols (Times New Roman, 12 pt., italic);
- **a list of key words** that begins with the words: "*Keywords:*" (Times New Roman, 12 pt., italic);
- *empty line* (Times New Roman, 12 pt.);

Description of Main Material of Research

The main text (Times New Roman, 12 pt.), which, in accordance with the requirements of MES of Ukraine, must contain the following selected items:

- Problem Statement;
- Analysis of Recent Researches and Publications;
- Purpose of the Study;
- Description of Main Material of Research;
- Conclusions;
- References.
- **information about the authors (see A Sample of the Article).**

Додаткові вимоги до елементів статті:

- **Pictures:** the captions under the pictures – Times New Roman, 10 pt., bold;
- **Formulas:** for typing formulas use only equation editor Microsoft Equation 3.0 or MathType; formula is on the line center; the numbering of formulas is on the right edge.
Sizes by default: Full – 12 pt; Subscript/Superscript – 7 pt; Sub-Subscript/Superscript – 5 pt; Symbol – 18 pt; Sub-symbol – 12 pt.
- **Programs:** for a set of fragments of the programs one should use the fonts Courier New (Courier);
- **References:** references for article in English is made in accordance with APA Style.

We suggest you use the following resources for transliteration:

- transliteration from Ukrainian: <http://ukrlit.org/transliteratsiia>
- transliteration from Russian: <http://translate.meta.ua/ru/translit/>

A SAMPLE OF THE ARTICLE

(The sample is composed of excerpts from various publications, the authors are fictitious personalities)

UDC XXX.XX

V.V. KRAVCHENKO, S.V. ONOPENKO
Kherson National Technical University
O.I. KOVALENKO
Kherson State University

THE PROPERTIES OF SCHEDULE CONSTRUCTION PROCEDURE

The properties of the schedule construction procedure, which formalizes the card method for manual scheduling, are considered. In the general formulation it is a process of ordering a certain finite set of events in time under resource and other constraints ...

Keywords: the schedule construction procedure, card method...

В.В. КРАВЧЕНКО, С.В. ОНОПЕНКО
Херсонський національний технічний університет
О.І. КОВАЛЕНКО
Херсонський державний університет

ВЛАСТИВОСТІ ПРОЦЕДУРИ ПОБУДОВИ РОЗКЛАДУ

Розглянуті властивості процедури побудови розкладу, яка формалізує картковий метод ручної побудови розкладу. У загальній постановці вона є процесом упорядкування деякої скінченної множини подій в часі за умов ресурсних та інших обмежень...

Ключові слова: процедура побудови розкладу, картковий метод...

В.В. КРАВЧЕНКО, С.В. ОНОПЕНКО
Херсонський національний технічний університет
А.І. КОВАЛЕНКО
Херсонський державний університет

СВОЙСТВА ПРОЦЕДУРЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПИСАНИЯ

Рассмотрены свойства процедуры построения расписания, которая формализует карточный метод ручного составления расписаний. В общей постановке она является процессом упорядочивания некоторого конечного множества событий во времени в условиях ресурсных и других ограничений ...

Ключевые слова: процедура построения расписания, карточный метод...

Problem Statement

The task of scheduling is one of the most common tasks that every person solves almost every day. In a general setting, it is a process of ordering a finite set of events over time under resource and other constraints.

Analysis of Recent Researches and Publications

An analysis of existing methods for solving the problem of classes scheduling shows that the solution of tasks from the theory of schedules has a known complexity. In content, these tasks belong to the class of combinatorial ones, for which dimension is essential ...

Purpose of the Study

The purpose of this study is an automation of classes scheduling for the distance learning system, taking into account the workload of the teaching staff. The quality of training, its economic efficiency, the convenience of students teaching and the work of the faculty members depends on a well-established schedule.

...

Conclusions

During the execution of the research, our own mathematical method was developed for scheduling, namely, a number of restrictions were determined that are taken into account when scheduling, the objective function was created to assess suitability ...

References

1. Ibrahim, R. (2005). *Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications*. Cambridge University Press.
2. Bochkarev, S. A., Lekomtsev, S. V., & Matveenko, V. P. (2015). Natural vibrations of loaded noncircular cylindrical shells containing a quiescent fluid. *Thin-Walled Structures*, **90**, 12–22. DOI: 10.1142/S0219455415500765
3. Gultom, J. H., Harsono, M., Khameswara, T. D., & Santoso, H. (2017). Smart IoT Water Sprinkle and Monitoring System for Chili Plant. Proceedings of the *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*. (Indonesia, Palembang, August 22-23, 2017). Palembang: Book Publishing, pp. 212–216. DOI: 10.1109/ICECOS.2017.8167136
4. Tymofiiieva, N. K. (2007). *Theoretical and Numerical Methods for Solving Combinatorial Optimization Problems*. (Extended abstract of Doctor's thesis), Kyiv: V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine.

...

Kravchenko Victor Viktorovich – Doctor of Engineering Science, professor, professor at the Department of Mathematical Modelling of Kherson National Technical University, kravchenko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4107-8141.

Onopenko Serhii Vasylovych – postgraduate student at the Department of Technical Cybernetics of Kherson National Technical University, onopenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5196-5301.

Kovalenko Oleksandr Ivanovych – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of the Informatics of Kherson State University, kovalenko@yandex.ua, ORCID: 0000-0002-6196-540.

ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Відповідальний за випуск	Хомченко Анатолій Никифорович, д.ф.-м.н., професор, заслужений діяч науки і техніки України
Технічний редактор	Литвиненко Олена Іванівна к.т.н., доцент
Макетування	Омельчук Антон Анатолійович

Свідоцтво про державну реєстрацію засобу масової інформації –
серія КВ № 23529-13369Р от 03.08.2018

Підписано до друку 29.08.2020 р. Формат 60x84/8 Папір офсетний.
Ум. друк. аркушів 36,1. Замовлення № 9/0820. Наклад 120 прим.

© Херсонський національний технічний університет 2020

Адреса редакції: 73008, м. Херсон, Бериславське шосе, 24, корп. 3,
каб. 425, тел. (0552) 32-69-95. E-mail: aqmm@kntu.net.ua

Видавництво та друк: «ОЛДІ-ПЛЮС»
вул. Паровозна, 46-А, м. Херсон, 73034
Свідоцтво ДК № 6532 від 13.12.2018 р.

Тел.: +38 (0552) 399-580, +38 (098) 559-45-45,
+38 (095) 559-45-45, +38 (093) 559-45-45
Для листування: а/с 20, м. Херсон, Україна, 73021
E-mail: office@oldiplus.ua