

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ КОМПЛЕКС  
«ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОГО СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ»  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

## СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО–ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 2

2020

ЗАСНОВАНО У ЛИПНІ 2001 р.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор

**М.З. ЗГУРОВСЬКИЙ**, акад. НАН України

Заступник головного редактора

**Н.Д. ПАНКРАТОВА**, чл.-кор. НАН України

Члени редколегії:

**П.І. АНДОН**, акад. НАН України

**А.В. АНІСІМОВ**, чл.-кор. НАН України

**Г.-В. ВЕБЕР**, проф., Турція

**О.Д. ГВІШАНИ**, акад. РАН, Росія

**П.О. КАСЬЯНОВ**, проф., д.ф.-м.н.,  
Україна

**В.М. КУНЦЕВИЧ**, акад. НАН України

**О.А. ПАВЛОВ**, проф., д.т.н., Україна

**Л. САКАЛАУСКАС**, проф., Литва

**А.М. САЛЕМ**, проф., Єгипет

**І.В. СЕРГІЄНКО**, акад. НАН України

**Х.-М. ТЕОДОРЕСКУ**, акад. Румунської  
Академії

**Е.О. ФАЙНБЕРГ**, проф., США

**Я.С. ЯЦКІВ**, акад. НАН України

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

03056, м. Київ,  
просп. Перемоги, 37, корп. 35,  
ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського  
Тел.: 204-81-44; факс: 204-81-44  
E-mail: journal.iasa@gmail.com  
<http://journal.iasa.kpi.ua>

### У номері:

• **Теоретичні та прикладні проблеми і методи системного аналізу**

• **Прогресивні інформаційні технології, високопродуктивні комп'ютерні системи**

• **Проблеми прийняття рішень та управління в економічних, технічних, екологічних і соціальних системах**

• **Теоретичні та прикладні проблеми інтелектуальних систем підтримання прийняття рішень**

• **Математичні методи, моделі, проблеми і технології дослідження складних систем**

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE  
EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC COMPLEX  
«INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEM ANALYSIS»  
OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE  
«IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

## SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

№ 2

2020

IT IS FOUNDED IN JULY 2001

### EDITORIAL BOARD:

#### The editor – in – chief

**M.Z. ZGUROVSKY,** Academician of  
NASU

#### Deputy editor – in – chief

**N.D. PANKRATOVA,** Correspondent  
member of NASU

#### Associate editors:

**F.I. ANDON,** Academician of  
NASU

**A.V. ANISIMOV,** Correspondent  
member of NASU

**E.A. FEINBERG,** Prof., USA

**A.D. GVISHIANI,** Academician of RAS,

**P.O. KASYANOV,** Prof., Ukraine

**V.M. KUNTHEVICH,** Academician of NASU

**A.A. PAVLOV,** Prof., Ukraine

**L. SAKALAUSKAS,** Prof., Lithuania

**A.M. SALEM,** Prof., Egypt

**I.V. SERGIENKO,** Academician of NASU

**H.-N. TEODORESCU,** Academician of  
Romanian Academy

**G.-W. WEBER,** Prof., Turkey

**Ya.S. YATSKIV,** Academician of NASU

### THE EDITION ADDRESS:

03056, Kyiv,  
av. Peremogy, 37, building 35,  
Institute for Applied System Analysis  
at the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute  
Phone: **204-81-44**; Fax: **204-81-44**  
E-mail: [journal.iasa@gmail.com](mailto:journal.iasa@gmail.com)  
<http://journal.iasa.kpi.ua>

### In the issue:

• **Theoretical and applied problems and methods of system analysis**

• **Progressive information technologies, high-efficiency computer systems**

• **Decision making and control in economic, technical, ecological and social systems**

• **Theoretical and applied problems of intellectual systems for decision making support**

• **Mathematical methods, models, problems and technologies for complex systems research**

## Шановні читачі!

Навчально-науковий комплекс «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» видає міжнародний науково-технічний журнал

### «СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ».

Журнал публікує роботи теоретичного та прикладного характеру в широкому спектрі проблем, пов'язаних із системними дослідженнями та інформаційними технологіями.

#### Провідні тематичні розділи журналу:

Теоретичні та прикладні проблеми і методи системного аналізу; теоретичні та прикладні проблеми інформатики; автоматизовані системи управління; прогресивні інформаційні технології, високопродуктивні комп'ютерні системи; проблеми прийняття рішень і управління в економічних, технічних, екологічних і соціальних системах; теоретичні та прикладні проблеми інтелектуальних систем підтримання прийняття рішень; проблемно і функціонально орієнтовані комп'ютерні системи та мережі; методи оптимізації, оптимальне управління і теорія ігор; математичні методи, моделі, проблеми і технології дослідження складних систем; методи аналізу та управління системами в умовах ризику і невизначеності; евристичні методи та алгоритми в системному аналізі та управлінні; нові методи в системному аналізі, інформатиці та теорії прийняття рішень; науково-методичні проблеми в освіті.

**Головний редактор журналу** — ректор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», академік НАН України Михайло Захарович Згуровський.

Журнал «Системні дослідження та інформаційні технології» включено до переліку фахових видань ВАК України.

Журнал «Системні дослідження та інформаційні технології» входить до таких наукометричних баз даних: EBSCO, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, реферативна база даних «Україніка наукова», український реферативний журнал «Джерело», наукова періодика України, ВІНІТІ РАН.

Статті публікуються українською, російською та англійською мовами.

Журнал можна передплатити. **Наш індекс 23918.** Якщо ви не встигли передплатити журнал, його можна придбати безпосередньо в редакції. Наша адреса: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 35.

Завідувача редакцією **С.М. Шевченко**

Редактор **Р.М. Шульженко**

Молодший редактор **Л.О. Тарин**

Комп'ютерна верстка, дизайн **А.А. Патіоха**

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 23234–13074 ПР від 22.03.2018 р.

---

Підписано до друку 04.11.2020. Формат 70x108 1/16. Папір офс. Гарнітура Times.

Спосіб друку – цифровий. Ум. друк. арк. 14,411. Обл.-вид. арк. 28,56. Наклад 132 пр. Зам. № 11/04

---

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Свідоцтво про державну реєстрацію: ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056.

ФОП Пилипенко Н.М., вул. Мічуріна, б. 2/7, м. Київ, 01014.

Виписка з Єдиного державного реєстру № 2 070 000 0000 0214697 від 17.05.2019 р.,

тел. (044) 361 78 68.

## **Dear Readers!**

Educational and Scientific Complex «Institute for Applied System Analysis» of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» is published of the international scientific and technical journal

### **«SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES».**

The Journal is printing works of a theoretical and applied character on a wide spectrum of problems, connected with system researches and information technologies.

#### **The main thematic sections of the Journal are the following:**

Theoretical and applied problems and methods of system analysis; theoretical and applied problems of computer science; automated control systems; progressive information technologies, high-efficiency computer systems; decision making and control in economic, technical, ecological and social systems; theoretical and applied problems of intellectual systems for decision making support; problem- and function-oriented computer systems and networks; methods of optimization, optimum control and theory of games; mathematical methods, models, problems and technologies for complex systems research; methods of system analysis and control in conditions of risk and uncertainty; heuristic methods and algorithms in system analysis and control; new methods in system analysis, computer science and theory of decision making; scientific and methodical problems in education.

**The editor-in-chief of the Journal** is rector of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», academician of the NASU Michael Zaharovich Zgurovsky.

The articles to be published in the Journal in Ukrainian, Russian and English languages are accepted. Information printed in the Journal is included in the Catalogue of periodicals of Ukraine.

# СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

2 • 2020

## ЗМІСТ

### ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ І МЕТОДИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

- Коршевнок Л.О.* Системний аналіз: еволюція і перспективи подальшого розвитку ..... 7
- Хижняк А.В., Федоровський О.Д.* Методичні засоби системного аналізу як складові методології аерокосмічного геомоніторингу розв'язання природоресурсних і екологічних завдань ..... 27

### ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ

- Кислий Р.В., Петренко А.І.* Розпізнавання людської діяльності за допомогою портативних натільних датчиків ..... 41
- Безпалько О.С.* Дослідження систем розпізнавання маркерів доповненої реальності ..... 55

### ПРОБЛЕМИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТА УПРАВЛІННЯ В ЕКОНОМІЧНИХ, ТЕХНІЧНИХ, ЕКОЛОГІЧНИХ І СОЦІАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

- Кузнєцова Н.В., Черниш З.С.* Застосування регресійних моделей для аналізу і прогнозування показників якості фінансової діяльності підприємства ..... 67
- Криваковська Р.В.* Використання байсових мереж для оцінювання точності результатів моделювання поширення домішок у повітрі за умови неточних вхідних даних ..... 82

### ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМАННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

- Zaychenko H., Zaychenko Yu.* Fuzzy portfolio optimization problem under uncertainty conditions with application of computational intelligence methods ..... 88
- Федин С.С., Зубрецькая Н.А.* Нейросетевое моделирование и оптимизация технологических параметров контактной точечной сварки ..... 103
- Леднікова А.А., Шупік Д.В., Бідюк П.І.* Аналіз ризиків проекту за допомогою текстового інтелектуального аналізу даних коментарів у системі управління проектами JIRA ..... 121

### МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ, ПРОБЛЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

- Кирилюк В.С., Левчук О.І., Гавриленко О.В., Вітер М.Б., Харитонова Л.В.* Математичне моделювання напруженого стану в ортотропному електропружному просторі з довільно орієнтованою сфероїдальною порожниною (під внутрішнім тиском) ..... 137
- Відомості про авторів ..... 149

# SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

2 • 2020

## CONTENT

<b>THEORETICAL AND APPLIED PROBLEMS AND METHODS OF SYSTEM ANALYSIS</b>	
<i>Korshevniuk L.O.</i> System analysis: evolution and perspectives of future development ....	7
<i>Khyzhniak A.V., Fedorovsky O.D.</i> Methodological approaches of system analysis as components of the methodology of aerospace geomonitoring for solving natural resources management and environmental problems .....	27
<b>PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES, HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS</b>	
<i>Kyslyi R.V., Petrenko A.I.</i> Human activity recognition using wearable sensors .....	41
<i>Bezpalko O.S.</i> Research of augmented reality marker recognition systems .....	55
<b>DECISION MAKING AND CONTROL IN ECONOMIC, TECHNICAL, ECOLOGICAL AND SOCIAL SYSTEMS</b>	
<i>Kuznietsova N.V., Chernysh Z.S.</i> Regression models application for analysis and forecasting of the financial activity quality indicators of the company .....	67
<i>Kryvakovska R.V.</i> Application of bayesian networks for accuracy estimation of modeling results of the air pollution dispersion given inaccurate input data .....	82
<b>THEORETICAL AND APPLIED PROBLEMS OF INTELLECTUAL SYSTEMS FOR DECISION MAKING SUPPORT</b>	
<i>Zaychenko H., Zaychenko Yu.</i> Fuzzy portfolio optimization problem under uncertainty conditions with application of computational intelligence methods .....	88
<i>Fedin S.S., Zubretska N.A.</i> Neural network modeling and optimization of technological parameters of contact spot welding .....	103
<i>Liednikova A.A., Shypik D.V., Bidyuk P.I.</i> Project risk analysis using text data mining of comments in project management system JIRA .....	121
<b>MATHEMATICAL METHODS, MODELS, PROBLEMS AND TECHNOLOGIES FOR COMPLEX SYSTEMS RESEARCH</b>	
<i>Kirilyuk V.S., Levchuk O.I., Gavrilenko O.V., Viter M.B., Kharytonova L.V.</i> Mathematical modeling of the stress state in an orthotropic electroelastic space with an arbitrary oriented spheroidal cavity under internal pressure .....	137
Information about the authors .....	149

УДК 519.711.3, 004.89  
DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2020.2.01

## СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ: ЕВОЛЮЦІЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

Л.О. КОРШЕВНЮК

*Ставтеся до майбутнього –  
як ніби воно вже тут.  
Ларрі Еллісон,  
співзасновник Oracle*

**Анотація.** Досліджено історичне формування та обґрунтовано перспективні напрями подальшого розвитку системних ідей в науці, послідовні зміни проблематики, виникнення і еволюція методології системного аналізу. Виокремлено шість історичних етапів від першого стародавнього «зародкового» (III ст. до н.е. – початок н.е.) до шостого сучасного етапу «піднесення» (початок XXI ст. – 2020 рр.). Кожний етап розкрито у розрізах часового інтервалу, основних територій розвитку, видатних вчених і дослідників, подій, об'єктів наукового вивчення, актуальної проблематики і методології. Проаналізовано сьомий майбутній «інтеграційний» етап (2020–2050 рр.), якому будуть властиві неформалізовані динамічні трансгалузеві проблеми у складних системах різної природи, що потребуватимуть розв'язань у режимі реального часу. Ключовим і перспективним напрямом розвитку передбачається методологічна інтеграція процедур системного аналізу та технологій штучного інтелекту.

**Ключові слова:** системний аналіз, системи штучного інтелекту, історичний розвиток науки, футурологія, передбачення.

### ВСТУП

Сучасні умови перебігу процесів у системах довільної природи та особливості діяльності людини у різноманітних галузях виявляють такі тенденції розвитку:

- 1) розширення сфер пізнання і підкорення людиною природного середовища, виникнення нових технологій і цілих галузей, що потребують розв'язання складних проблем;
- 2) поступове і швидке ускладнення систем завдяки постійним процесам інтеграції підсистем та елементів;
- 3) стрімке прискорення існуючих процесів;
- 4) значне почастищення моментів настання ситуацій якісних змін у структурі процесів або повної заміни процесів новими.

Результатом таких тенденцій є те, що якщо ще нещодавно, у другій половині минулого сторіччя, переважна більшість нагальних актуальних

завдань у діяльності людини належала до класу детермінованих проблем, певна кількість складних завдань — до класу слабкоструктурованих і незначна кількість найскладніших завдань у стратегічних галузях — до неформалізованих, то в сучасних умовах розвитку суспільних відносин і технологій переважна більшість завдань належить до класів слабкоструктурованих, складноформалізованих та неформалізованих проблем [1].

Однією з основних і найвиразніших причин таких перетворень є стрімке наростання процесів світової інтеграції та глобалізації. Для України врахування таких процесів та особливостей їх перебігу є надзвичайно важливим для коректного розв'язання складних проблем у всіх галузях діяльності людини. У сучасних умовах країни, що стали на шлях ринкового розвитку, незалежно від їх волі чи бажання швидко втягуються у процеси глобалізації. Тому важливим і необхідним є точне розуміння нових тенденцій і процесів, що забезпечить побудову коректних та ефективних стратегій розвитку країни [2, 3].

На міждержавному світовому рівні, і в Україні зокрема, ще й досі актуальними і невирішеними залишаються задачі прийняття рішень і управління сучасними динамічними процесами, зокрема інтеграційними, у системах довільної природи, що обґрунтовується наявністю характерних проблем [2, 4]:

1) неузгодженість цілей управління з інтересами учасників управлінських процесів, що потребує розв'язання і врегулювання внутрісистемних конфліктів;

2) переважна більшість рішень має багатоетапний характер і передусім спрямована на дотримання інтересів окремих підрозділів ніж системи в цілому;

3) велика кількість випадкових подій і ризиків, низький рівень явних причинно-наслідкових зв'язків у процесах взаємопов'язаних систем різної природи, і як наслідок складність прогнозування процесів;

4) суб'єктивний характер експертного оцінювання стану досліджуваної системи і параметрів процесів та суперечливість експертних знань;

5) надзвичайно великий обсяг вихідних даних та інформаційних джерел, недостовірність, невизначеність та нечіткість багатьох даних;

6) складна динаміка процесів і систем, часті випадки різкої зміни структури процесів.

Такі специфічні і загальні проблеми в розв'язанні актуальних завдань потребують використання системного підходу і створення засобів аналізу й оптимізації складних економічних, соціальних, технічних та інших систем, що виникли внаслідок стрімкого науково-технічного прогресу і соціально-економічного розвитку світової цивілізації у XXI ст. і мають специфічні властиві Україні особливості, проблеми і ризики. У свою чергу такі завдання потребують поєднання зусиль фахівців у різних галузях діяльності, уніфікації підходів різних наукових і практичних напрямів та визначення компромісів між ними. Інтеграція методів дослідження і проектування складних систем, застосування математичних, організаційних і методологічних інструментів пошуку і реалізації рішень, спрямованих на усунення проблем, дали значний поштовх виникненню і розвитку над- і міждисциплінарних досліджень із системного аналізу соціальних, економічних, технічних та інших процесів, які сьогодні в Україні стають найпріоритетнішим науковим напрямом.



## ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

**Мета роботи** — аналіз історичного розвитку системних ідей в науці, проблем і методів системного аналізу, виділення актуальної проблематики і методології та формування обґрунтованих перспективних напрямів подальшого розвитку методології системного аналізу для цілей розв’язання майбутніх неформалізованих і динамічних задач аналізу, ідентифікації, прийняття рішень та управління. Саме ці напрями визначають актуальний в майбутньому новий методологічний інструментарій, який необхідно завбачливо планувати й розробляти вже тепер.

## ЕВОЛЮЦІЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

Цілі майбутнього можливо уявити і досягнути через дослідження минулого та усвідомлення сучасних процесів. Розвиток системного аналізу як методології розв’язання взаємопов’язаних проблем різної природи має цікаву насичену історію [2, 3, 5]. Формування системних ідей і поглядів у світі почалося разом з виникненням суспільних відносин ще у давні часи. У процесі розвитку від перших системних уявлень до сучасного системного аналізу як загальнометодологічної науки пізнання можна виокремити шість основних історичних етапів (рис. 1).

*Перший стародавній «зародковий» етап* (III ст. до н.е. – початок нашої ери). На цьому етапі відбуваються емпіричне виникнення і становлення перших системних ідей, які формуються у процесі практичної діяльності людства і розвитку ранніх філософських шкіл. Системність оточення і Всесвіту виявила себе у процесах вивчення законів природи та навколишнього середовища. У практичній пізнавальній практиці людства виникали потреби у чіткій організації певних відносин, наприклад, потреба у системі поділу земельних ділянок або у системі врахування урожаю і натуральних продуктів у стародавньому Єгипті [6].

Приблизно у III–II ст. до н.е. у стародавній Греції виникло поняття «система» (старогрец. *σύστημα*), що означало уклад, устрій, спільноту, єднання, цілісне, складене з частин, або певні дії з упорядкування. Спочатку термін «система» використовувався у сфері соціально-історичного розвитку, а пізніше ідеї системності були перенесені на опис Всесвіту. У перших античних джерелах поняття «система» застосовувалось для опису упорядкованості природних об’єктів, а для штучних об’єктів використовувався термін «синтаґма» (старогрец. *σύνταγμα*). Пізніше систему стали розглядати як таку, що пояснює все істотне [7, 8].

Основи системних уявлень на даному етапі закладені відомими філософами античності. Вивченням законів взаємодії речей та відношень у закономірностях розвитку Всесвіту займалися Піфагор (570–490 рр. до н.е.) та його послідовники. Піфагор бачив систему у нерозривному взаємозв’язку всього існуючого, природи, людини, космосу [8, 9]. Сучасник і критик Піфагора Геракліт (540–480 рр. до н.е.) вважав, що єдність речей є очевидною і «лежить» прямо на поверхні і залежить від збалансованих взаємодій між протилежностями. За його вченням поєднання, тобто «речі, що взяті разом», в одному сенсі описуються як «ціле», тобто такі, що фактично формують систему, а в іншому сенсі — як «не ціле», тобто як набір одиничних компонентів: «з усього — одне, з одного — все» [8, 10]. А античний філософ Анаксагор (500–428 рр. до н.е.) стверджував «все у всьому» і «з усього — все». Він вважав, що жодна річ не може виникнути чи зникнути, а утворюється з об’єднання вже існуючих речей — у кінцевому підсумку з нескінченно малих елементів дійсного світу, «гомеомерій» (насіння речей), які спочатку були в безладі і утворювали хаос [11].



Сократ (469–399 рр. до н.е.) повернув античне філософське мислення до себе самого — до дослідника, до аналізу власних принципів, прийомів і методів пізнання [12]. Він фактично осяг важливість і необхідність комплексного погляду на природу речей і поклав міркування системності в основу методів пізнання та дослідження. Аристотель (384–322 рр. до н.е.) започаткував формальну логіку та систематизував знання античного світу [13]. Він створив загальну систему філософії, що охоплює всі сфери людського буття: соціологію, політику, логіку і фізику. Древньогрецький філософ і мислитель Епікур (342–270 рр. до н.е.) у свої творах для опису космосу, світового порядку і загальної організованості Всесвіту використовував поняття «система» [14]. Відомий древньогрецький астроном і географ Гіппарх (190–120 рр. до н.е.) систематизував і створив перший у Європі зоряний каталог з точними координатами понад 1000 зірок, запропонував систему зоряних величин, яка в удосконаленому вигляді фактично застосовується і тепер, та розробив моделі прогнозування руху небесних тіл з прийнятною на той час точністю [15].

Отже, на першому стародавньому етапі розвитку системного аналізу виникали та відшліфовувались окремі ідеї, гіпотези, поняття і випадкові інтуїтивні відкриття видатних філософів і мислителів. Давні дослідники намагались осягнути належний зв'язок речей і досягнути справжнього розуміння того, як влаштований світ: знати все як одне. Основні наукові методи, що були створені і розвинуті на цьому етапі, були спрямовані на пізнання та аналіз будови Всесвіту як цілісної системи, опису законів природи, створення моделей світоустрою, вивчення людини і її місця у Всесвіті та дослідження соціальних відносин у суспільстві. Необхідно відзначити фактичне зародження елементів системного аналізу динамічних процесів, що виявилось у дослідженнях не лише сучасного для філософів буття, а й через призму зв'язків між минулим та майбутнім.

*Другий «ембріональний» етап* (початок нашої ери — початок ХХ ст.). У період пізньої античності до кінця VI ст. здійснюється подальша універсалізація і узагальнення поняття «система», що дозволяло застосовувати його до фізичних і штучних об'єктів у всіх галузях пізнання Всесвіту. У середньовічний умовний період 500–1500 рр. н.е. буття з предмета спостереження перетворюється на предмет соціально-наукового аналізу. У період нової історії від початку XVI ст. аж до початку ХХ ст. виникають, відокремлюються та стрімко розвиваються різні науки, кожна з яких аналізує свою предметну галузь. На цьому етапі системність свідомо чи несвідомо становиться методом кожного наукового напрямку.

Відомий олександрійський астроном і математик Клавдій Птолемей (87–165 рр.) виходив із системної інтерпретації Всесвіту, і майже на півтори тисячі років сформулював геоцентричну модель будови Сонячної системи [15]. Філософ і лікар Клавдій Гален (130–200 рр.) систематизував античні знання у єдиний науковий напрям у біологічних науках та медицині [16]. Італійський дослідник Леонардо да Вінчі (1452–1519 рр.) зробив вагомий внесок у розвиток системної наукової думки середньовіччя. Він протиставляє абстрактним міркуванням методологію спостереження, експерименту та індукції. [17]. Вагому роль у розвитку системних уявлень відіграли дослідження німецько-польського астронома Миколи Коперніка (1473–1543 рр.), який визнав помилковість геоцентричної системи Птолемея і запропонував геліоцентричну систему Всесвіту [18]. Італійський вчений і астроном Галілео Галілей (1564–1642 рр.) заклав основи класичної механіки і дав поштовх

теорії ймовірностей і теорії множин. Галілей розглядав Всесвіт як величезну систему, механізм, а складні природні процеси — як поєднання взаємопов'язаних елементарних причин, головно з яких — це механічний рух [19]. Вагомий внесок у системні уявлення зробив Джордано Бруно (1548–1600 рр.), який стверджував, що Світ — це система систем [20]. Німецький математик, астроном і оптик Йоганнес Кеплер (1571–1630 рр.) побудував систему динаміки планет, що дозволяла точно прогнозувати їх рух [21]. Англійський філософ, фізик, математик, астроном і алхімік Ісаак Ньютон (1643–1727 рр.) зробив першу систематичну публікацію закону всесвітнього тяжіння і трьох законів механічного руху [22].

Видатний російський вчений Михайло Васильович Ломоносов (1711–1765 рр.) розглядав різні науки і наукові напрями у логічній системній єдності, яка обумовлена єдністю фундаментальних законів природи, з яких випливає цілісне розмаїття явищ [23]. Німецький філософ Іммануїл Кант (1724–1804 рр.) активно розвинув системні погляди у філософії [24]. Французький вчений П'єр Сімон Лаплас (1749–1827 рр.) розробив основи небесної механіки, обґрунтував виникнення Сонячної системи з первинної туманності та фактично розвинув і систематизував апарат теорії ймовірностей [25]. Французький фізик і математик Андре-Марі Ампер (1775–1836 рр.) показав необхідність застосування наукового підходу до управління складними системами та запропонував термін «кібернетика» для означення окремої науки з управління державою [26]. Видатний англійський вчений і дослідник Чарльз Дарвін (1809–1882 рр.) обґрунтував наукові основи еволюційної теорії і разом з Альфредом Уоллесом сформулював принципи природного добору, привніс системні математичні підходи у біологію [27]. Відомий російський вчений Дмитро Іванович Менделєєв (1834–1907 рр.) відкрив фундаментальний закон світоутворення, який сформулював у періодичній системі елементів [28]. Подальший розвиток системних ідей Д.І. Менделєєва привів до сприйняття атома як складної системи. Англійський фізик Ернест Резерфорд (1871–1937 рр.) створив планетарну модель атома [29].

Таким чином, у періодах пізньої античності, середньовіччя та нової історії розвиток системних ідей відбувався поступово, з переходом від стихійного і неусвідомленого використання системності в науковому пошуці до планомірного усвідомленого застосування системного підходу у всіх наукових напрямках. У цей час відбувається систематизація наукового досвіду і знань, формується та застосовується класична методологія точних наук. При цьому науковий розвиток спрямовується не лише на вирішення практичних завдань, але й сам формулює фундаментальні проблеми, які надалі отримують свій розв'язок. Необхідно зазначити, що на другому «ембріональному» етапі багато дослідників розробляли окремі системні ідеї, не називаючи їх системними, оскільки така галузь знань ще не була відокремлена.

*Третій «паростковий» етап* (початок ХХ ст. – середина 50-х років ХХ ст.). Цей етап характеризується поширенням і укріпленням системних уявлень у кожній галузі науки. Стрімкий розвиток індустріального суспільства у першій половині ХХ ст., вибухові соціальні процеси, транспортно-комунікаційна фаза науково-технічного прогресу і військові конфлікти на початку сторіччя привели до значної позитивної динаміки у фундаментальних і прикладних природничих науках і відповідно до подальшого розвитку системних ідей та мислення. Так, датський фізик і нобелівський лауреат

Нільс Бор (1885–1962 рр.) розвинув концепцію системного сприйняття атома Резерфорда, відкрив дуалізм електрона і запропонував квантову теорію атома [30]. Видатний російський вчений, академік і нобелівський лауреат Іван Петрович Павлов (1849–1936 рр.) створив учення про вищу нервову діяльність і фактично започаткував активну фазу системних досліджень у фізіології, психіатрії та психології людини [31]. Російський вчений Олександр Олександрович Богданов (справжнє прізвище Малиновський, 1873–1928 рр.) заснував перший у світі Інститут переливання крові, випередив праці Н. Вінера та Л. фон Берталанфі і справедливо вважається попередником кібернетики та загальної організаційної науки — тектології [32]. Англійський математик Алан Тьюрінг (1912–1954 рр.), якого вважають засновником інформатики і теорії штучного інтелекту [33], та угорсько-американський дослідник і вчений Джон фон Нейман (1903–1957 рр.) — творець сучасної архітектури обчислювальних машин, теорії ігор і моделі клітинних автоматів [34], зробили важливий внесок у розвиток інформаційних технологій і обчислювальних засобів. Австрійський біолог Людвіг фон Берталанфі (1901–1972 рр.) на поєднанні знань з фізики, хімії і біології запропонував узагальнену системну теорію, упровадив поняття відкритої системи [35].

Американський математик Норберт Вінер (1894–1964 рр.) вважається одним із засновників кібернетики і теорії штучного інтелекту [36]. Він фактично спровокував масове усвідомлення системності світу і застосування системних понять. Варто відзначити внесок і інших відомих учених: англійський психіатр і кібернетик Уільям Росс Ешбі (1903–1972 рр.) увів поняття самоорганізації [37]; мексиканський біолог Артуро Розенблют (1900–1970 рр.) разом з Н. Вінером розробили клітково-автоматну модель збудженого середовища; англійський біолог Джон Бердон Сандерсон Холдейн (1892–1964 рр.) — один із засновників популяційної, математичної, молекулярної і біохімічної генетики та синтетичної теорії еволюції [38], та інші.

Цей період характеризується відкриттям спеціалізованих наукових і прикладних установ, що орієнтовані на проведення системних досліджень у різних галузях. У 1939 р. у Москві був заснований Інститут автоматики і телемеханіки, який з 1969 р. був перейменований у загальновідомий Інститут проблем керування, у 1948 р. у США була створена відома дослідницька організація RAND Corporation (**R**esearch **A**ND **D**evelopment). Розквітають і набувають широкого застосування методи збирання та статистичного аналізу даних. Більшість підходів поки орієнтовані на дослідження окремих складових систем. Разом з тим виникає науковий напрям «структуралізм», а також такі класи методів системних досліджень, як структурно-функціональний аналіз та структурно-семантичний аналіз. Явища і процеси розглядаються як структурно розділена цілісність, у якій для кожного структурного елемента передбачено своє функціональне і семантичне призначення.

Таким чином, на «паростковому» етапі розвитку системного аналізу у першій половині XX ст. відбувається перехід від механістичної картини Всесвіту, від механіцизму у науковому пізнанні до узагальнень, нового системного бачення, структуралізму, елементів формалізації і математизації досліджуваних процесів і систем та зародження науки про дослідження

складних систем. Фахівці різних наукових галузей вивчили, що більшість природних систем, наприклад біологічні і соціальні, є відкритими і фактично не перебувають у стійкому і рівноважному стані, тому їх дослідження не можливе в межах механістичного світогляду, за яким система досліджується як сума її частин. Поняття «система» дедалі частіше застосовують для позначення складного структурно організованого об'єкта, у якому можна виокремити структуру, взаємодію частин, стани і переходи. Конкретні наукові принципи системної методології і аналізу систем почали викристалізуватися у 20–30-х роках ХХ ст.

*Четвертий етап «визрівання»* (середина 50-х років ХХ ст. – початок 70-х років ХХ ст.) характеризується початком широкого проникнення системності у всі галузі науки. Виникають окремі системні наукові напрями, такі як системотехніка, системологія, системна біологія, системна інженерія тощо. На даному етапі у країнах-лідерах та у найбільших транснаціональних корпораціях відбувається подальше створення спеціалізованих установ і підрозділів з проведення системних досліджень у певних предметних галузях. Корпорація з розроблення систем (System Development Corporation) — одна з перших фірм з розроблення програмного забезпечення — була створена у 1955 р. як група з інженерії систем для військових проектів у корпорації RAND. У 1959 р. у США в Кейсівському технологічному інституті (Case Institute of Technology) був створений Центр системних досліджень (Systems Research Center) [39]. У 1963 р. корпорація «IBM» започатковує Інститут системних досліджень (Systems Research Institute) [39]. У 1957 р. був заснований обчислювальний центр Академії наук УРСР, який у 1962 р. перетворений в Інститут кібернетики.

Починаючи з кінця 1950-х років у різних країнах світу (США, Японії, СРСР, Польщі, Болгарії та ін.) організуються і проводяться наукові конференції, симпозіуми та семінари із системної проблематики. У цей період починається видання спеціальної літератури, зокрема періодичної, про проблеми теорії систем. Починаючи з 1956 р. у США виходить щорічне видання «General Systems», а з 1959 р. у СРСР — «Системные исследования». Широкої популярності набув журнал Американського інституту радіоінженерів «IEEE Transaction on Systems Science and Cybernetics» [39].

Значуща роль у поширенні і закріпленні системних принципів у всіх галузях діяльності людини в цьому і у всіх наступних періодах належить появі та стрімкому розвитку автоматизованих обчислювальних засобів. У 1950-х роках з'явилися перші великі комп'ютери, які використовувались для обчислень під час розв'язування військових та наукових завдань. 1960-ті роки ознаменовані виникненням систем керування інформацією та впровадженням обчислювальних засобів, крім військового і наукового, ще і в корпоративний сектор економіки. Нагромадження великих обсягів даних зумовило наприкінці 1960-х – початку 1970-х років появу систем керування базами даних (СКБД) та розділення напряму розвитку обчислювальних засобів на два вектори: 1) розвиток обчислювальних можливостей електронних систем для математичних розрахунків та 2) розвиток можливостей комп'ютерів для менеджменту даних, тобто для збереження, оброблення і оперативного доступу до даних.

Вагомий внесок у розвиток системності в науці зробили американський інженер Дж. Р. Форрестер, (запропонував теорію системної динаміки [40]), сербсько-американський математик і системний теоретик Михайло Д. Месарович, який фактично заснував системну біологію і математичну загальну теорію систем [41], Г.П. Щедровицький, В.М. Глушков, В.А. Геодакян, російсько-бельгійський вчений І.Р. Пригожин (виконав ґрунтовні дослідження синергетики та самоорганізації систем [42]), В.О. Лефевр, Д.О. Поспелов, Ф.С.Темніков, М.Г. Гаазе-Рапопорт, Е.Л. Наппельбаум, А.І.Уйюмов, Р. Калман, К. Боулдінг, У. Росс Ешбі, азербайджано-американський вчений Л. Заде (запропонував нечітку логіку, теорію м'яких обчислень, лінгвістичні змінні, вербальні уявлення і обчислення, що значно збільшили можливості формалізації прикладних задач системного аналізу [43]), С. Оптнер та інші відомі вчені.

Методологічно у цей період становлення теорії систем, досягнення у математиці й електронно-обчислювальній техніці сприяли виникненню і розвитку галузі науки з прийняття рішень щодо організації управління, дослідження операцій, теорії ймовірностей і оцінювання, теорії ігор, нечіткої логіки та штучних нейронних мереж.

Таким чином, із середини ХХ ст. після Другої світової війни потреби практики викликали необхідність у спеціальному теоретичному і методологічному обґрунтуванні процесів розв'язування актуальних детермінованих і стохастичних задач з урахуванням умов ризику. Основними об'єктами задач є процеси керування у соціальних, економічних і технічних системах. Різко зросли комплексність і складність задач, збільшилась кількість взаємопов'язаних факторів, посилилась залежність між окремими елементами систем, значно зросли витрати на реалізацію рішень та можливі ризики невдачі. За таких умов у результаті розвитку й узагальнення була сформована широка і універсальна методологія розв'язання проблем — *системний аналіз* [1].

*П'ятий етап «зрілості»* (початок 70-х років ХХ ст. – початок ХХІ ст.). У цей період учені різних наук і наукових напрямів, філософи, математики, фізики, хіміки, біологи та інші виробили остаточне спільне розуміння загального поняття складної системи як структурно організованого об'єкта, у якому виділяють структури і взаємодії частин, стани і переходи та розуміння того, що парадигма системного аналізу надає можливість аналізувати складні об'єкти різної природи з позицій єдиної загальної методології.

Основна проблематика даного періоду зосереджена на дослідженні процесів складних соціальних, економічних, екологічних, технічних та біологічних систем, створенні автоматизованих систем керування. Актуальними постають слабкоструктуровані і складноформалізовані проблеми в умовах наявності ризику і невизначеностей, що містять невідомі компоненти або компоненти, які складно оцінити кількісно. Для зазначених проблем властива наявність як кількісних, так і якісних залежностей, причому, як правило, якісні та маловідомі характеристики проблеми превалюють над кількісними, і характерною є відсутність методів розв'язування задач на основі безпосередніх перетворень даних. Такі задачі частково описуються певними математичними моделями, але через недостатність наявної інформації на момент розв'язування не мають однозначного алгоритмічного розв'язку. В минулому основою розв'язання проблем даного класу були лише творчі можливості людини, її інтуїція, кваліфікація та досвід. Сучасний інструментарій мето-

дології системного аналізу дозволяє формалізувати якісні дані та виконувати пошук раціональних рішень за умов неповної і суперечливої інформації.

У цей період активно розвиваються лінгвістичні підходи до формалізації якісних понять, експертні методи оцінювання факторів задачі, характеристик об'єктів і параметрів альтернатив, методики ідентифікації і моделювання стохастичних процесів, теорія автоматичного керування, прикладна і системна математика, теорія графів, методи багатокритеріальної і багатоцільової оптимізації, еволюційні методи пошуку розв'язків [44]. Американський математик Т. Сааті запропонував популярний метод аналізу ієрархій, який дає змогу структурувати складну проблему у вигляді ієрархії і виконати кількісне порівняння альтернативних варіантів розв'язання [45]. Значного поширення набуває застосування принципів синергетики і самоорганізації в управлінні системами різної природи. Системний підхід до розв'язання різноманітних задач в управлінській діяльності відображається у розвитку методології побудови «дорожньої карти» розв'язання проблеми та у розвитку напряму управління проектами [1, 5].

Збільшення потужності комп'ютерів у поєднанні з новими інструментами і методами програмування, поява персональних комп'ютерів та розповсюдження системного і прикладного програмного забезпечення у цей період було настільки широким, що зумовило тотальне проникнення тих чи інших засобів автоматизації і комп'ютеризації у кожен сферу діяльності людини. Розпочалася ера мережевих технологій, об'єднання обчислювальних машин мережі, мереж у ще більші мережі та була сформована глобальна світова обчислювальна мережа Інтернет. За кількісним розширенням і об'єднанням систем починається наступний крок якісного розвитку корисних прикладних можливостей обчислювальних систем, етап виникнення і широкого впровадження людино-машинних систем. Варто відзначити виникнення і активний розвиток в цей період систем підтримання прийняття рішень [46].

Серед основних подій цього періоду слід відзначити створення у 1972 р. в Австрії Міжнародного інституту прикладного системного аналізу (IIASA), у 1976 р. у РРФСР Інституту системних досліджень РАН та у 1997 р. в Україні Інституту прикладного системного аналізу (ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ»). Значний внесок у розвиток системного аналізу в цей період був зроблений багатьма світовими дослідниками, зокрема, Д.М. Гвішіані, М.З. Згуровським, Д.О. Поспеловим, С. Пейпертом, Б.А. Трахтенбротом, Б.А. Березовським, П. Кругманом, М.А. Айзерманом, Ф.Т. Алескеровим та іншими. Французький і американський математик Б. Мандельброт запропонував фрактальну геометрію, що знайшла застосування у дослідженні нелінійних динамічних систем.

Таким чином, у цей період відбувається процес глибокого формування системного аналізу як методу аналітичної діяльності, методу наукових досліджень. Системний метод активно використовує процес широкої комп'ютеризації і автоматизації діяльності для наукових відкриттів і здійснення технологічних розробок. Системний аналіз наприкінці ХХ ст. стає загальним світоглядом, який використовують фахівці в усіх галузях і наукових напрямах.

*Шостий сучасний етап «піднесення»* (початок ХХІ ст. – 2020 рр.) характеризується виникненням і актуальністю значної кількості складноформалі-



зовних проблем, вирішення яких ґрунтується на неструктурованій інформації за високого ступеня невизначеності. Більшість таких проблем містять лише якісний опис параметрів проблеми і зв'язків між ними, а кількісні залежності важко і часто неможливо достовірно визначити через відсутність або неповноту необхідних даних.

Розв'язування сучасних проблем ускладнюється особливостями динаміки розвитку досліджуваних систем, що проявляється у змінах структури процесів чи систем у часі, руйнуванням старих та утворенням нових взаємозв'язків між елементами системи. Як наслідок наявні історичні дані та залежності не відповідають новим умовам функціонування і структурам систем і в повному обсязі виявляються непридатними до застосування. Тому на даному етапі значного розвитку набули інструменти застосування експертних методів та методологія передбачення.

Прикладами актуальних проблем, пов'язаних з динамікою розвитку, можуть бути: *в економічних і фінансових системах* – розподіл обмежених фінансових ресурсів, прогнозування курсу цінних паперів і валют, прогнозування попиту на нові товари, наявність товарів на нових ринках, прогнозування динаміки міжнародної торгівлі тощо; *в організаційних і соціальних системах* — прогнозування впливів політичних змін на соціальні трансформації, передбачення розвитку соціодемографічних процесів, моделювання соціальних процесів під впливом природних лих та проявів тероризму, аналіз сталого розвитку суспільства тощо; *у технічних системах* — технологічне передбачення, адаптивне керування динамічними технічними об'єктами, підвищення надійності систем, прогнозування динаміки надійності та подовження строків використання складного обладнання тощо [47].

Стрімку позитивну динаміку у розвитку системного аналізу на сучасному етапі забезпечують праці таких учених, як М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова, О.П. Кузнецов, Ф.Т. Алескеров, Ф.Ф. Пашенко, П. Гудвін, П. Кабат та багато інших. Більшість досліджень виконується і тепер.

Цей період характеризується стрімким розвитком прогресивних сучасних методів інтелектуального аналізу даних і технологій штучного інтелекту, байєсівських методів і мереж Байєса (зокрема праці П.І. Бідюка), нейронних мереж (зокрема праці Ю.П. Зайченка), штучних імунних мереж, мультиагентних систем, прикладних методів на основі нечіткої логіки і теорії хаосу. Характерним є створення гібридних систем і методів, наприклад, нейронечітких моделей, нейроімунних мереж, нечітких мереж Байєса і т. ін.

Найбільш цікавим з практичних позицій постає *майбутній сьомий «інтеграційний» етап* (2020–2050 рр.), який вже планомірно настає. Основні нагальні проблеми, які виникатимуть у найближчому майбутньому та з якими вже стикаються вчені і практики за останнє десятиріччя, — це неформалізовані динамічні проблеми у складних системах різної природи, що потребують розв'язування у режимі реального часу. Динамічні проблеми значно складніші за статичні, оскільки в їх розв'язуванні необхідно враховувати змінність у часі не тільки структури досліджуваної системи, але й усіх або певних параметрів задачі [48]. У реальних сучасних прикладних проблемах досить часто стикаються з різкими змінами структури процесів чи систем, кризовими явищами та екстремальними ситуаціями. Крім того, у таких проблемах, наприклад з часом, можуть змінюватись цілі управлін-

ня, оцінки альтернатив і сам набір альтернатив, а певні параметри задачі описуються функціями у часі. Для динамічних проблем характерним є те, що критерієм оптимальності є не функції, як у статичних проблемах, а складні функціонали, залежні від функцій часу, що описують динаміку системи, стосовно якої розв'язується проблема.

У багатьох актуальних задачах майбутнього етапу кількісні залежності невідомі через відсутність або недостовірність необхідних даних; відомі здебільшого тільки загальні закономірності, що описані розпливчато, щодо яких побудувати строгу математичну модель неможливо. На стадії постановки задачі передбачити і спрогнозувати зміни всіх параметрів динамічних проблем дуже складно, тому такі проблеми намагаються розв'язувати покроково і частково з постійною адаптацією до поточних умов.

Проблеми майбутнього вже не зможуть бути розкладені та зведені до розв'язування однієї чи декількох простих задач невеликим набором інструментів з існуючих методів. Здебільшого це комплексні взаємопов'язані динамічні задачі часто з різних галузей, що містять параметри та дані різної природи і мають різні ступені взаємного впливу. Характерними для таких задач є недостатність даних, умови реального часу, наявність невизначеностей та ризиків довільної природи із загрозою їх каскадного настання.

Приклади зазначених проблем:

у *фінансових, економічних і соціальних системах*: передбачення та розроблення дієвих заходів запобігання світовим фінансовим і економічним кризам та їх відвернення, точне прогнозування динаміки обсягів попиту на обраних товарних ринках, розроблення методик комплексного спільного врахування ризиків довільної природи, наприклад, економічних, фінансових, екологічних і кліматичних, соціодемографічних, біологічних і пандемічних, терористичних, політичних, технологічних та інших ризиків у межах єдиної задачі точного прогнозування динаміки світової економіки;

у *біологічних і екологічних системах*: розроблення систем комплексного «фонового» моніторингу процесів функціонування організму людини та установлення точних діагнозів захворювань, прогнозування ефективності лікування та розроблення персоналізованих ліків прямої дії, прогнозування процесу глобального потепління, кліматичних змін і впливів на біосферу через збільшення емісії CO<sub>2</sub>;

у *технічних системах*: створення автономних універсальних систем керування антропоморфною робототехнікою, побудова автономної універсальної системи керування безпілотними літальними апаратами або безпілотними автомобілями у всіх умовах, у яких здатна ефективно керувати людина, автоматизоване прийняття рішень щодо керування складними об'єктами на основі даних неруйнівного контролю, такими як атомні електростанції, хімічні підприємства, небезпечні техногенні об'єкти.

Особливістю нових проблем є їх трансгалузевість, за якої проблема одночасно стосується систем різної природи і може потребувати у межах одного загального розв'язувального процесу спільного і глибокого дослідження, наприклад, технічних, екологічних, соціальних і фінансових систем.

Натепер більшість таких проблем часто навіть не намагаються розв'язувати комплексно, зараховуючи їх до категорії проблем VUCA-світу (VUCA: volatility, uncertainty, complexity, ambiguity — нестабільність, неви-

значеність, складність, неоднозначність) [49]. З різною мірою успіху вдається розв'язувати лише окремі локальні підзадачі. Проте існуючі розв'язки певних ділянок загальних проблем не здатні забезпечити необхідний рівень автоматизації і автономності процесів у реальній людській діяльності.

Фактично проблеми майбутнього потребуватимуть спільного та взаємозв'язаного розв'язання окремих складових задач у режимі реального часу, і у зв'язку з цим уже тепер виникають два вкрай важливі напрями розвитку наукової і прикладної методології.

Сучасний світ активно рухається у напрямку автоматизації людської діяльності, і вже не тільки фізичної роботи, але й інтелектуальної розумової діяльності, зокрема в дослідженнях і прийнятті рішень. Рутинна інтелектуальна робота, передусім на частинах роботи, де необхідно обробляти великі масиви інформації, передоручається *штучному інтелекту*. Він її виконає швидше і краще, а людина зможе зосередитися на найскладніших творчих частинах.

Утім усі сучасні технології штучного інтелекту розвиваються і досягли успіху лише в комбінаторних чи обчислювальних застосуваннях, тобто у розв'язанні задач, де необхідно проаналізувати величезні масиви даних, перебрати велику кількість варіантів розв'язків і вибрати серед них найбільш прийнятні щодо заданих критеріїв. Якщо складна прикладна проблема за допомогою методології системного аналізу може бути зведена до таких постановок задач, то її, безумовно, ефективно розв'яже штучний інтелект. У найближчі два десятиріччя в діяльності, де алгоритми обробляють дані швидше, краще і в перспективі дешевше ніж людина, людська інтелектуальна праця поступово буде витіснена штучним інтелектом.

Розвиток технологій штучного інтелекту в останні роки зумовив появу і лавиноподібне збільшення технологій *інтернету речей* (IoT — Internet of Things), за якими фізичні пристрої буття обладнують можливостями обміну даними через під'єднання до обчислювальних мереж. За прогнозами експертів загальний обсяг ринку інтернету речей до 2026 р. сягне 1,11 трлн дол. США [50]. У свою чергу, поширення технологій інтернету речей спонукає до ще інтенсивнішого розвитку штучного інтелекту. Тому можна передбачати, що вже за першу половину наступного етапу сукупність усіх технологій, що належать до штучного інтелекту, стане ключовою методологією оброблення даних для прийняття рішень майже у всіх сферах, об'єднавши й інтегрувавши інші існуючі методи роботи з даними.

Але для розв'язання складних прикладних проблем майбутнього, де, крім використання існуючих знань, необхідно продукувати й нові і потрібна велика творча складова, технології сучасної обчислювальної парадигми штучного інтелекту недостатньо ефективні, а в більшості випадків непридатні.

Цікавим є те, що науковий напрям штучного інтелекту виник і розвивався як комплекс окремих інкапсульованих технологій, які побудовані на ідеях природного інтелекту та які фактично лише обслуговували обчислювальні ділянки загальних методологій аналізу систем і процесів та методів прийняття рішень. А необхідне для майбутнього етапу нове покоління технологій штучного інтелекту, які доцільно буде назвати *мислячим штучним інтелектом* (*Thinking Artificial Intelligence* або *Smart Artificial Intelligence*),

зможе з'явитись лише за допомогою якісно нової інтеграції та розвитку міцних зв'язків між системним аналізом і штучним інтелектом.

Нового значення набуває і необхідність подальшого розроблення методології системного аналізу, яка ще на стадіях постановки і декомпозиції задач фактично забезпечить адміністрування та взаємне узгодження процесів і методів розв'язання окремих галузевих задач з урахуванням комплексних ризиків системи таким чином, щоб вирішення окремих задач інтегрувались у єдине узагальнене вирішення комплексної проблеми.

Вочевидь, що в таких умовах вибір процедур і методології системного аналізу для застосування до розв'язуваної проблеми значною мірою залежить від процесу імплементації методів розв'язання задач. Це пояснюється тим, що методи, які попередньо мають усі ознаки ефективної застосовності у конкретних умовах використання, можуть виявитись неприйнятними, що надто пізно потребуватиме змін постановок локальних оптимізаційних задач чи виконання додаткових процедур системного аналізу і коригування постановки загальної проблеми. У складних динамічних проблемах реального часу такий розвиток процесу часто є неприпустимим, оскільки може призвести до втрати актуальності або до розбалансування вирішення загальної проблеми. А у критичних системах з обмеженістю ресурсів, наприклад, часу, фінансів, міцності, простору, — навіть до катастрофічних наслідків для системи.

Утім, навпаки, конкретні реалізації, застосування і коригування методів розв'язання окремих задач перебувають під безпосереднім контролем процедур системного аналізу загальної розв'язуваної проблеми. Це пояснюється тим, що вже на етапі застосування методів розв'язання окремих локальних задач необхідно враховувати, що їх проміжні розв'язки в подальшому можуть використовуватись для пошуку загального розв'язку та для виконання наступних процедур аналізу, адаптації моделей, коригування їх параметрів, ініціації повторних обрахунків тощо, що не може бути вирішено безпосередньо на рівні методу розв'язання, оскільки може залежати від загальної постановки проблеми, методів та отриманих проміжних і кінцевих розв'язків інших супутніх задач. Такі положення можуть бути вирішені на рівні виконання процедур системного аналізу і розв'язання загальної проблеми.

Отже, на майбутньому етапі, який уже настає, технології штучного інтелекту практично не зможуть розвинути якісно нові необхідні можливості без інтеграції у методологію системного аналізу, а методологія системного аналізу в багатьох галузях буде стикатися з певними труднощами у розв'язанні нових прикладних проблем без інтеграції зі штучним інтелектом ще на первісному рівні процедур дослідження систем і процесів. Можна стверджувати, що окремі процедури системного аналізу залежатимуть здебільшого від використовуваних засобів штучного інтелекту і фактично міститимуть частини цих інтелектуальних методів.

Таким чином, глибока зустрічна та взаємодоповнювальна інтеграція системного аналізу і штучного інтелекту на рівні методології постає неминучим процесом, який зрештою виявляється достатньо корисним і цілком відповідає викликам та завданням нового етапу, відповідно названого інтеграційним.

Основними факторами такого об'єднувального процесу стануть тривале зростання складності систем та актуалізація саме динамічних постановок проблем, оскільки розв'язки статичних задач уже не відповідатимуть новим

запитах галузей. Сама структура прикладних методів системного аналізу у майбутньому інтеграційному етапі буде орієнтована на дослідження систем і розв'язання проблем у динамічних умовах з урахуванням невизначеностей і передбачатиме зворотний зв'язок від реалізації методів розв'язання кінцевих окремих задач загальної проблеми.

Саме зазначений процес інтеграції забезпечить якісний перехід обчислювальної парадигми сучасних технологій штучного інтелекту до мислячої і ключовим драйвером такої трансформації буде методологія системного аналізу.

Наприкінці майбутнього інтеграційного етапу з'являться перші реалізації мислячих інтелектуальних систем із зростаючою автоматизацією процесів та автономізацією процедур. Нова методологія та реалізовані на її основі системи фактично зможуть отримувати вхідну неформалізовану проблему та знаходити і приймати рішення з мінімальною участю людини.

У результаті властиві методології системного аналізу універсальність та застосовність для систем зі складовими різної природи набудуть нових проявів, що дозволить поєднувати і спільно досліджувати різноманітні елементи довільної природи та розв'язувати надскладні проблеми реального світу комплексно.

Наприклад, можливість у реальному часі комплексно враховувати цілком різноманітні ризики у єдиній проблемі, наприклад, технічні, фінансові, екологічні, кліматичні, політичні, техногенні, соціодемографічні [51], дозволить підійти до розв'язання проблем зниження темпів глобального потепління, зменшення терористичної активності, вирівнювання балансу розвитку різних регіонів світу, що зменшить прояви загальнокризових явищ та значно зменшить непродуктивне навантаження на світову економіку; страховим компаніям і фінансовому сектору надасть додаткові можливості для розширення діапазону послуг та випадків страхування, які нині обмежені стандартними підходами до актуарних розрахунків; наблизить технічні системи до створення цілком автономних систем безпілотного керування роботехнікою, авто- і авіатранспортом тощо [52].

Вочевидь, дослідження та вирішення складних динамічних проблем майбутнього періоду більш орієнтовані не стільки на їх розв'язання за допомогою конкретних методів, а більше на опис і вибір принципів та правил застосування методів розв'язання задач, і вже у процесі функціонування системи в автоматизованому чи у напівавтоматизованому режимі реалізовуватимуться конкретні методи, які будуть найбільш релевантні поточній ситуації та стану системи відповідно до заданих правил і принципів.

Відбудеться перехід від використання методів розв'язання задач до *проектування процесу розв'язання задач* на основі палітри автоматизованих методів розв'язання. Схожий процес узагальнення та підняття на рівень вище вже відбувався у минулі десятиріччя з переходом програмування обчислювальних пристроїв від кодів до мови асемблера і потім до мов програмування високого рівня.

Отже, для того, щоб увійти в новий майбутній етап розвитку наукового напрямку системного аналізу з конкурентними можливостями доцільно сфокусувати дослідження на розробленні нових інтелектуальних методів системного аналізу та запропонувати підходи до проектування процесів розв'язання складних неформалізованих динамічних задач різноманітних галузей на основі інтеграції існуючої методології аналізу і технологій штучного інтелекту. Як влучно відзначив Пітер Друкер: «Найкращий спосіб передбачити майбутнє — це створити його» [53].

## ВИСНОВКИ

Виконано аналіз історичного розвитку системних уявлень, процесу формування і розвитку системного аналізу як наукової та прикладної дисципліни, досліджено еволюцію і перспективи проблематики та методології системного аналізу. Відзначено, що в еволюції системного підходу простежується характерна закономірність. Наприкінці кожного етапу відбувається *методологічне насичення* щодо можливостей вирішення актуальних завдань для даного періоду. Нові методи і підходи, що виникають наприкінці кожного етапу, дозволяють розв'язувати те саме коло задач і при цьому лише несуттєво підвищують ефективність процесів прийняття рішень і самих рішень. Разом з цим прогрес і виникаючі потреби прикладної науки ставлять дедалі складніші завдання і проблеми наступного рівня і вимагають пошуку якісно нових підходів до їх вирішення. Така ситуація приводить до утворення переходів і нових витків у дослідженнях та в розвитку системних ідей, що, відповідно, відображається в появі чергових етапів в еволюції системної парадигми.

У сучасному періоді розвитку науки вкрай актуальними є і будуть надалі задачі структуризації і прийняття рішень у складних динамічних системах різної природи в умовах наявності невизначеностей. Багато існуючих підходів орієнтовані на розв'язання задач «у статиці» і не можуть бути ефективно використані в сучасних реаліях. Тому за основними напрямками розвитку системного аналізу слід очікувати подальший розвиток методологій передбачення і прогнозування, методів інтелектуального аналізу даних і управління сталим розвитком, розроблення методів і підходів до оцінювання результатів альтернативних варіантів рішень та методів прийняття рішень у динаміці.

Ключовим і перспективним напрямом подальшого розвитку передбачається методологічна інтеграція технологій штучного інтелекту та процедур системного аналізу. Тому для забезпечення майбутньої конкурентоспроможності наукової галузі доцільно приділити увагу розробленню нових та універсальних інтелектуальних методів системного аналізу і підходів до проектування процесів розв'язання складних динамічних проблем довільної природи.

## ЛІТЕРАТУРА

1. М.З. Згуровский и Н.Д. Панкратова, *Системный анализ: проблемы, методология, приложения*. Киев.: Наук. думка, 2005.
2. М.З. Згуровский, *Шляхи нашого відродження*, Київ: Генеза, 2002.
3. О.В. Половцев, П.І. Бідюк, Л.О. Коршевнюк, та І.І. Семенчев, *Системний підхід до моделювання, прогнозування та управління фінансово-економічними процесами*. Донецьк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2009.
4. L. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning — I", *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199–249, 1975. doi:10.1016/0020-0255(75)90036-5
5. М.З. Згуровский, А.В. Доброногов, и Т.Н. Померанцева, *Исследование социальных процессов на основе методологии системного анализа*. Киев: Наук. думка, 1997.
6. Р.М. Нуреев, *Всемирная история экономической мысли: в 6 т.*, гл. ред. В.Н. Черковец, т. 2. Москва: Мысль, 1987.
7. А.М. Кориков и С.Н. Павлов, *Теория систем и системный анализ: учеб. пособие*. Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2008.
8. А.В. Ахутин, *Античные начала философии*. Санкт-Петербург: Наука, 2007.

9. L. Zhmud, *Pythagoras and the Early Pythagoreans*. Oxford: Oxford University Press, 2012.
10. Ф.Х. Кессиди, *Гераклит*, 3-е изд., испр., доп. Санкт-Петербург: Алетейя, 2004.
11. И.Д. Рожанский, *Анаксагор*. Москва: Мысль, 1983.
12. Ф.Х. Кессиди, *Сократ*, 4-е изд., испр. и доп. Санкт-Петербург: Алетейя, 2001.
13. В.П. Зубов, *Аристотель. Человек. Наука. Судьба наследия*. Москва: Едиториал УРСС.
14. М.М. Шахнович, *Сад Эпикура. Философия религии Эпикура и эпикурейская традиция в истории европейской культуры*. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2002.
15. В.А. Бронштэн, *Клавдий Птолемей*. Москва: Наука, 1988.
16. Клавдий Гален, *О назначении частей человеческого тела*, пер. С.П. Кондратьева, под ред. и с примеч. В.Н. Терновского, вступ. ст. В.Н. Терновского и Б.Д. Петрова. Москва: Медицина, 1971.
17. Леонардо да Винчи, *Избранные произведения Леонардо да Винчи*, пер. Василий Зубов, Владимир Шилейко, Абрам Эфрос. Москва: Изд-во студии Артемия Лебедева, 2010.
18. И.С. Дмитриев, *Искушение святого Коперника: ненаучные корни научной революции*. Издательство С.-Петербургского университета, 2006.
19. И.С. Дмитриев, *Увещание Галлея*. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2006.
20. А.Х. Горфункель, *Джордано Бруно*. Москва: Мысль, 1973.
21. Ю.А. Данилов, “Гармония и астрология в трудах Кеплера”, *Прекрасный мир науки*. Москва: Прогресс-Традиция, 2008, с. 253–265.
22. A. Einstein and L. Infeld, *The Evolution of Physics*. Touchstone, 1967.
23. Г.Е. Павлова и А.С. Федоров, *Михаил Васильевич Ломоносов*. Москва: Наука, 1986.
24. И. Кант, *Критика практического разума*. Київ: Юніверс, 2004.
25. Б.А. Воронцов-Вельяминов, *Лаплас*. Москва: Наука, 1985.
26. Л.Д. Белькинд, *Андре-Мари Ампер*. Москва: Наука, 1968.
27. Ч. Дарвин, *Происхождение видов путём естественного отбора*. Санкт-Петербург: Наука, 1991.
28. Д.И. Менделеев, *Периодический закон*, ред. Б.М. Кедрова. Москва: Издательство академии наук СССР, 1958.
29. *Резерфорд—ученый и учитель. К 100-летию со дня рождения*, под редакцией П.Л. Капицы. Москва: Наука, 1973.
30. Д.С. Данин, “Нильс Бор”, *Жизнь замечательных людей*. Москва: Молодая гвардия, 1978.
31. В.И. Артамонов, *Психология от первого лица. 14 бесед с российскими учеными*. Москва: Академия, 2003.
32. Е.В. Сеницын, “Тектология А. Богданова и современные методы анализа сложных систем”, *Вестник международного института А.Богданова*, № 1, с. 49–57, 2000.
33. Ю.В. Матиясевич, “Алан Тьюринг и теория чисел”, *Математическое просвещение*. Москва: Изд-во МЦНМО, 2013, вып. 17, с. 6–34.
34. J. Von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*, 60th Anniversary Commemorative Ed. Princeton University Press, 2007.
35. L. von Bertalanffy, *General Systems Theory: Foundations, Development, Applications*, rev. ed., George Braziller, 2007.
36. Н. Винер, *Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине*, пер. с англ. И.В. Соловьева и Г.Н. Поварова; под ред. Г.Н. Поварова. Москва: Наука; Главная редакция изданий для зарубежных стран, 1983.
37. У.Р. Эшби, *Конструкция мозга. Происхождение адаптивного поведения*. Москва: ИЛ, 1962.
38. Г.Э. Фельдман, *Джон Бэрдон Сандерсон ХОЛДЕЙН 1892–1964*. Москва: Наука, 1976.
39. Ю.С. Мануйлов и Новиков Е.А., *Методология системных исследований*. Санкт-Петербург: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2008.
40. J.W. Forrester, *World Dynamics*, 2nd rev. ed., Wright-Allen Press, 1971.
41. Mihailo Mesarovic, *Abstract Systems Theory*. Springer, 1989.
42. И. Пригожин и И.Стенгерс, *Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой*. Москва: Прогресс, 1986.

43. L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information and Control*, no. 8, pp. 338–353, 1965. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
44. П.І. Бідюк, Л.О. Коршевніюк, та Н.В. Кузнєцова, *Моделі і методи прикладної статистики: навч. посіб.* Київ: НТУУ «КПІ», 2014.
45. Т. Саати, *Принятие решений. Метод анализа иерархий*, пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. Москва: Радио и связь, 1993.
46. П.І. Бідюк, Л.О. Коршевніюк, А.С. Коваленко, та О.П. Гожий, *Проектування інформаційних систем підтримки прийняття рішень: навч. посіб.* Київ: НТУУ «КПІ», 2013.
47. М.З. Згуровский и Н.Д. Панкратова, *Технологическое предвидение*. Киев: Политехника, 2005.
48. Н.Д. Панкратова, "Системный анализ в динамике диагностирования сложных технических систем", *Системні дослідження та інформаційні технології*, № 1, с. 33–49, 2008.
49. B. Nanus, *Leaders: The strategies for taking charge*. New York: Harper & Row, 1985.
50. *Internet of Things (IoT) Market Size, Share and Industry Analysis By Platform, By Software & Services, By End-Use Industry And Geography Forecast, 2019–2026, Region : Global, Report ID: FBI100307* [Електронний ресурс]. Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market-100307>
51. Л.О. Коршевніюк та П.І. Бідюк, "Формалізація постановки задачі керування ризиками в системах різної природи", *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, № 6, с. 49–54, 2013.
52. Л.О. Коршевніюк, "Визначення пріоритетів ризикових ситуацій при керуванні динамічними системами", *Механіка гіроскопічних систем [Системи та процеси керування]: наук.-техн. зб.*, № 30, с. 5–16, 2015. doi:<http://dx.doi.org/10.20535/0203-377130201569860>
53. *Цитати Пітера Друкера* [Електронний ресурс]. Доступно: [https://uk.wikiquote.org/wiki/Пітер\\_Фердинанд\\_Друкер](https://uk.wikiquote.org/wiki/Пітер_Фердинанд_Друкер)

Надійшла 26.06.2020

### INFORMATION ON THE ARTICLE

**L.O. Korshevniuk**, ORCID: 0000-0003-1597-8901, Educational and Scientific Complex "Institute for Applied System Analysis" of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine, e-mail: [lev@cabinet.kiev.ua](mailto:lev@cabinet.kiev.ua).

**SYSTEM ANALYSIS: EVOLUTION AND PERSPECTIVES OF FUTURE DEVELOPMENT** / L.O. Korshevniuk

**Abstract.** The paper considers the historical formation and directions of further developing system ideas in science, problem changes, and the evolution of a system analysis methodology. There are six historical periods defined from the first ancient "embryonic" (III century BC – beginning of AD) to the sixth modern "rising" period (beginning of the XX century – 2020s). Each period is described in the parameters of time intervals, main territories, outstanding scientists and researchers, events, objects of scientific studies, issues, and methodology. The seventh future "integration" period (the 2020s–2050s) is predicted to be characterized by informal, dynamic trans-industry problems in complex systems of various nature and will require real-time solutions. The issue discovers that technical science development's key and perspective direction is the methodological integration of system analysis procedures and artificial intelligence technologies.

**Keywords:** systems analysis, artificial intelligence systems, historical development of science, futurology, foresight.

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ: ЭВОЛЮЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ** / Л.А. Коршевніюк

**Аннотация.** Исследовано историческое формирование и обоснованы перспективные направления дальнейшего развития системных идей в науке, последовательные изменения проблематики, появление и эволюция методологии сис-



темного аналізу. Виділено шість історических етапів від першого древнього «зачаточного» (III в. до н.е. – початок н.е.) до шостого сучасного етапу «підйому» (початок ХХ в. – 2020 рр.). Кожен етап розкритий в параметрах часових інтервалів, основних територій розвитку, видатних учених і дослідників, подій, об'єктів наукового вивчення, актуальної проблематики і методології. Проаналізовано сьомий майбутній «інтеграційний» етап (2020–2050 рр.), якому будуть присущі неформалізовані динамічні трансгалузеві проблеми в складних системах різної природи, що вимагають рішень в режимі реального часу. Ключовим і перспективним напрямком розвитку передбачається методологічна інтеграція процесу системного аналізу і технологій штучного інтелекту.

**Ключові слова:** системний аналіз, системи штучного інтелекту, історическе розвиток науки, футурологія, передбачення.

## REFERENCES

1. M.Z. Zgurovsky and N.D. Pankratova, *System analysis: problems, methodology, applications*. Kiev: Naukova Dumka, 2005.
2. M.Z. Zgurovsky, *The path of our rebirth*. Kiev: Geneza, 2002.
3. O.V. Polovtsev, P.I. Bidyuk, L.O. Korshevniuk, and I.I. Semenchov, *System approach to modeling, prognostics and management by financial and economic processes*. Donetsk: TOV «Shidnyi vydavnychiy dim», 2009.
4. L. Zadeh, “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning — I”, *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199–249, 1975. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](http://dx.doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5)
5. M.Z. Zgurovsky, A.V. Dobronogov, and T. N. Pomerantseva, *Research of social processes on the basis of methodology of the system analysis*. Kiev: Naukova Dumka, 1997.
6. R.M. Nureyev, *The World History of Economic Thought: in 6 vol.*, gen. ed. by V.N. Cherkovets, vol. 2. Moscow: Mysl', 1987.
7. A.M. Korikov and S.N. Pavlov, *Systems theory and system analysis: tutorial*. Tomsk: Tomsk State University of Control System and Radio Electronics, 2008.
8. A.V. Akhutin, *Ancient principles of philosophy*. St. Petersburg: Nauka, 2007.
9. L. Zhmud, *Pythagoras and the Early Pythagoreans*. Oxford: Oxford University Press, 2012.
10. F.K. Kessidi, *Heraclitus*, 3rd ed., rev. and exp. St. Petersburg: Aleteya, 2004.
11. I.D. Rozhanskii, *Anaxagoras*. Moscow: Mysl', 1983.
12. F.K. Kessidi, *Socrates*, 4th ed., rev. and exp. St. Petersburg: Aleteya, 2001.
13. V.P. Zubov, *Aristotle. Person. The science. The fate of the heritage*. Moscow: Editorial URSS.
14. M.M. Shakhnovich, *Garden of Epicurus: Philosophy of religion of Epicurus and Epicurean tradition in history of European culture*. St. Petersburg: SPb University press, 2002.
15. V.A. Bronstein, *Claudius Ptolemy*. Moscow: Nauka, 1988.
16. Galen Claudius, *On the appointment of the human body parts*, translated by S.P. Kondrat'eva, ed. and comm. by V.N. Ternovskiy. Moscow: Meditsina, 1971.
17. Leonardo da Vinci, *Selected works Leonardo da Vinci*, translated by V. Zubov, V. Shileyko, A. Efros. Moscow: Art. Lebedev Studio Publishing House, 2010.
18. I.S. Dmitriev, *Temptation of St. Copernicus: Unscientific roots of the Scientific Revolution*. St. Petersburg: SPb University press, 2006.
19. I.S. Dmitriev, *Exhortation of Galileo*. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2006.
20. A.H. Gorfunkel, *Giordano Bruno*. Moscow: Mysl', 1973.
21. Y.A. Danilov, “Harmony and an astrology in Kepler's works”, in *Wonderful world of science*, (in Russian), Moscow: Progress-Traditcia, 2008, pp. 253–265.
22. A. Einstein and L. Infeld, *The Evolution of Physics*. Touchstone, 1967.
23. G.E. Pavlova and A.S. Fedorov, *Mikhail Vasilievich Lomonosov*. Moscow: Nauka, 1986.
24. I. Kant, *Critique of Pure Reason*. Kiev: Universe, 2004.
25. B.A. Vorontsov-Velyaminov, *Laplace*. Moscow: Nauka, 1985.

26. L.D. Belkind, *Andre-Marie Ampere*. Moscow: Nauka, 1968.
27. C. Darwin, *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. St. Petersburg: Nauka, 1991.
28. D.I. Mendeleev, *Periodic law*, ed. by B.M. Kedrov. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House, 1958.
29. *Rutherford — scientist and teacher: the 100th anniversary of his birth*, ed. by P. L. Kapitsa. Moscow: Nauka, 1973.
30. D.S. Danin, *Niels Bohr (Life of Wonderful People)*. Moscow: Molodaya Hvardyya, 1978.
31. V.I. Artamonov, *Psychology in the First Person. 14 conversations with Russian scientists*. Moscow: Akademia, 2003.
32. E.V. Sinitin, “A. Bogdanov’s Tektologia and modern methods of analysis of complex systems”, *Bulletin of international A. Bogdanov institute*, no. 1, pp. 49–57, 2000.
33. Y.V. Matiyasevich, “Alan Turing and Number Theory”, *Math. Education*, Moscow: Publishing house MCCME, no. 17, pp. 6–34, 2013.
34. J. Von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*, 60th Anniversary Commemorative Ed., Princeton University Press, 2007.
35. L. von Bertalanffy, *General Systems Theory: Foundations, Development, Applications*, rev. ed., George Braziller, 2007.
36. N. Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, transl. from En. by I.V. Solovev and G.N. Povarov; ed. by G.N. Povarov. Moscow: Nauka, 1983.
37. W.R. Ashby, *Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behavior*. Moscow: IL, 1962.
38. G.E. Feldman, *John Burdon Sanderson Haldane 1892-1964*. Moscow: Nauka, 1976.
39. Y.S. Manuylov and E.A. Novikov, *System research methodology*. St. Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy, 2008.
40. J.W. Forrester, *World Dynamics*, 2nd rev. ed., Wright-Allen Press, 1971.
41. Mihailo Mesarovic, *Abstract Systems Theory*. Springer, 1989.
42. I. Prigogine and I. Stengers, *Order out of chaos: Man’s new dialogue with nature*. Moscow: Progress, 1986.
43. L.A. Zadeh, “Fuzzy Sets”, *Information and Control*, no. 8, pp. 338–353, 1965. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
44. P.I. Bidyuk, L.O. Korshevniuk, and N.V. Kuznetsova, *Models and methods of applied statistics: Tutorial*. Kyiv: NTUU “KPI”, 2014.
45. T.L. Saaty, *Decision Making. Analytic hierarchy process*, transl. from En. by R.G. Vachnadze, Moscow: Radio and communications, 1993.
46. P.I. Bidyuk, L.O. Korshevniuk, A.Ye. Kovalenko, and O.P. Gozhiy, *Design of decision support information systems: Tutorial*. Kyiv: NTUU “KPI”, 2013.
47. M.Z. Zgurovsky and N. D. Pankratova, *Technological foresight*. Kiev: Polytehnika, 2005.
48. N.D. Pankratova, “System analysis in the dynamics of diagnosing complex technical systems”, *Systems research and information technology*, no.1, pp. 33–49, 2008.
49. B. Nanus, *Leaders: The strategies for taking charge*. New York: Harper & Row, 1985.
50. *Internet of Things (IoT) Market Size, Share and Industry Analysis By Platform, By Software & Services, By End-Use Industry And Geography Forecast, 2019 - 2026, Region: Global, Report ID: FBI100307* [Online]. Available: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/internet-of-things-iot-market-100307>. Accessed Jan. 19, 2019.
51. L.O. Korshevniuk and P.I. Bidyuk, “Formalization of the Problem or Risk Management in Systems of Different Natures”, *Research Bulletin of the NTUU KPI*, no. 6, pp. 49–54, 2013.
52. L.O. Korshevniuk, “Prioritizing risk situations in dynamic systems control”, *Mechanics of gyroscopic systems [Systems and control processes]: Sci.-Tech. Coll.*, no.30, pp. 5–16, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377130201569860>
53. *Quotes from Peter Drucker* [Online]. Available: [https://uk.wikiquote.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D1%82%D0%B5%D1%80\\_%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%B4\\_%D0%94%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%B5%D1%80](https://uk.wikiquote.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D1%82%D0%B5%D1%80_%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%B4_%D0%94%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%B5%D1%80) (in Ukrainian). Accessed Mar. 06, 2019.

## МЕТОДИЧНІ ЗАСОБИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ЯК СКЛАДОВІ МЕТОДОЛОГІЇ АЕРОКОСМІЧНОГО ГЕОМОНІТОРИНГУ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИРОДОРЕСУРСНИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ЗАВДАНЬ

А.В. ХИЖНЯК, О.Д. ФЕДОРОВСЬКИЙ

**Анотація.** Показано можливість використання деяких розроблених, модифікованих і адаптованих методичних засобів системного аналізу як складових методологій аерокосмічного геомоніторингу для розв'язання природоресурсних і екологічних завдань, а саме це методи: статистичного критерію, багатокритеріальної оптимізації, аналітичних мереж, системної динаміки, фрактального і структурно-текстурного аналізу. Наведені методи ілюструються конкретними прикладами вирішення тематичних завдань, що поряд з принципами системності, міждисциплінарності і структуризації є основою методології аерокосмічного геомоніторингу раціонального природокористування та відновлення навколишнього природного середовища.

**Ключові слова:** методи, моделі, аерокосмічний геомоніторинг, системність, міждисциплінарність, структуризація, дистанційне зондування Землі.

### ВСТУП

Сучасна концепція аерокосмічного геомоніторингу (АКГМ) полягає не тільки в забезпеченні регулярних спостережень за станом довкілля, але й у дослідженнях, спрямованих на отримання більш повних уявлень про об'єкт і супутні процеси на основі використання нових функціональних можливостей, які підвищують ефективність використання інформації АКГМ для розв'язання природоресурсних та екологічних завдань.

У роботі показано можливість та доцільність застосування методичних засобів системного аналізу до розв'язання природоресурсних та екологічних завдань для забезпечення раціонального природокористування та відновлення навколишнього природного середовища.

Вибір об'єкта дослідження обумовлений тим, що однією з наріжних та необхідних, проте недостатніх умов сталого розвитку є розв'язання природоресурсних та екологічних завдань для раціонального природокористування, а саме: а) добування і перероблення природних ресурсів, їх відтворення і відновлення; б) використання і охорона природних умов середовища життя; в) збереження, відтворення і раціональні зміни екологічного балансу природних систем, що є основою збереження природно-ресурсного потенціалу розвитку суспільства [1].

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У роботі розглядається можливість та доцільність застосування методичних засобів системного аналізу до розв'язання природоресурсних та екологічних

завдань для забезпечення раціонального природокористування і відновлення навколишнього природного середовища. Це методи: статистичного критерію, багатокритеріальної оптимізації, аналітичних мереж, системної динаміки, фрактального і структурно-текстурного аналізу. Наведені приклади вирішення тематичних завдань: класифікації сільськогосподарських полів, комплексування оцінок, отриманих методами різних наукових дисциплін, детального оцінювання і вибору найбільш нафтогазоперспективної ділянки, оцінювання структури складових урболандшафту, комплексне оцінювання стану міського середовища та оцінювання динаміки змін руслових гирлових потоків, що поряд з принципами системності, міждисциплінарості і структуризації є основою методології аерокосмічного геомоніторингу раціонального природокористування та відновлення навколишнього природного середовища.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

**Метод статистичного критерію розв'язання природоресурсних і екологічних завдань.** Основною перевагою запропонованого методу на основі евристичного критерію перед іншими статистичними методами вважається структуризація складної задачі шляхом обчислення ступеня належності значень параметрів досліджуваних об'єктів з даними об'єкта, взятого за еталон.

У праці [2] для подання евристичного критерію розпізнавання класів об'єктів за результатами вимірювання їх інформативних ознак у статистичних теоріях ідентифікації і розпізнавання застосовуються ймовірнісні і статистичні методи, які використовуються для вирішення завдань оптимізації. Для розглянутих задач інтерес становить оброблення матеріалів багатозональних аерокосмічних знімків, експертних даних та різнорідних картосхем з метою класифікації об'єктів за відомими еталонами. Емпіричні дані вказують на те, що значення спектральної яскравості та вхідних даних  $\bar{\xi}_q = (\xi_{q1}, \dots, \xi_{qk})$  конкретного досліджуваного об'єкта або групи об'єктів під номером  $q$  змінюються від поля до поля випадковим чином, набуваючи значень у колі своїх середніх значень. Відповідно до цього вектор  $\xi_q$  будемо вважати випадковим, координати якого є випадковими нормально розподіленими величинами.

Відповідність указаних розподілів нормальному встановлюється за вибірковими значеннями за допомогою, наприклад, критерію Пірсона  $\chi^2$ , або критерію Колмогорова, або критерію Смірнова.

Середні значення  $D_{q,k}$  і середньоквадратичні  $\sigma_{q,k}$  обчислюються за стандартними формулами:

$$D_{q,k} = \frac{1}{N_q} \sum_{n=1}^{N_q} \xi_{q,k,n};$$

$$\sigma_{q,k} = \pm \sqrt{\frac{1}{N_q - 1} \sum_{n=1}^{N_q} (\xi_{q,k,n} - D_{q,k})^2},$$

де  $N_q$  — обсяг вибірки для визначення невідомих параметрів випадкової величини,  $\xi_{q,k}$ ;  $\xi_{q,k,n}$  — її вибіркові значення.

Функція  $P_{q,k}(t_k)$ , яка є щільністю розподілу випадкової величини  $\xi_{q,k,n}$ , має вигляд

$$P_{q,k}(t_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{q,k}} e^{-\frac{(t_k - D_{q,k})^2}{2\sigma_{q,k}^2}},$$

а багатовимірною щільністю  $P_q(\bar{t})$  розподілу вектора  $\bar{\xi}_q$  визначається як добуток

$$\begin{aligned} p_q(\bar{t}) &= p_q(t_1, \dots, t_k) = p_{q_1^1}(t_1) \times \dots \times p_{q_1^k}(t_k) = \\ &= \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{K}{2}} \prod_{k=1}^K e^{-\frac{(t_k - D_{q,k})^2}{2\sigma_{q,k}^2}} \times \frac{1}{\sigma_{q,k}}. \end{aligned}$$

Задане значення вектора  $\bar{X} = (X_1, \dots, X_k)$  розглядається як вибіркове значення деякого випадкового вектора  $\bar{\xi}_q$  з невідомим значенням  $q$ , яке необхідно визначити. Це відповідає тому факту, що ділянка, яка розглядається, має той чи інший ступінь навантаження з номером  $q$ .

Мета дослідження полягає в тому, щоб вказати критерій, який дозволить з високою мірою упевненості визначити номер  $q$  за заданим значенням вектора  $\bar{X}$ . При цьому повинно бути достеменно відомо, що ділянка, яка досліджується, має конкретний ступінь навантаження з номерами  $1, k, q$ . Це означає, що із сукупності конкуруючих гіпотез  $H_q$  у кількості  $q$  потрібно обрати ту, яка найбільше відповідає набору  $\bar{X}$ .

Остаточно отримуємо критерій у вигляді

$$C_q = \frac{P_q(\bar{X})}{\sum_{r=1}^Q P_r(\bar{X})}.$$

Кінцевим продуктом цього процесу є визначення класу досліджуваних об'єктів за максимальним значенням імовірності їх відношення до конкретного об'єкта-еталона, відповідного класу та створення картосхеми, що характеризує результати вирішення поставлених завдань природокористування чи екології.

Поданий метод застосовано для розв'язання задач із пошуку вуглеводнів на суходолі за наявності двох і більше класів еталонів, для класифікації сільськогосподарських полів та оцінювання їх стану, для оцінювання техногенного навантаження на гірничо-промислові території.

Як приклад наведено результати класифікації сільськогосподарських полів методом статистичного критерію (рис. 1).

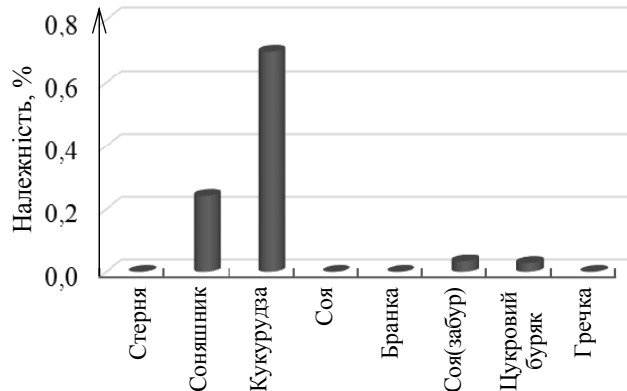


Рис. 1. Результати апробації методу статистичного критерію на сільськогосподарських полях Київської області

Для кожної з 5 культур (соняшник, кукурудза, соя, цукровий буряк, гречка) вибираються еталонні ділянки по 15 еталонних значень спектральних характеристик.

Як видно з рис. 1, запропонований метод дає можливість отримати результати не лише загальної класифікації за культурами, а і їх відсоткової належності одна одній. Це розширює можливості подальшого оцінювання стану посівів конкретної сільськогосподарської культури.

**Метод багатокритеріальної оптимізації (МБО).** Адаптований до розв’язання природоресурсних завдань на основі комплексування результатів, отриманих методами різних наукових дисциплін і створення міждисциплінарного віртуального еталона. Адаптація методу для вирішення конкретного завдання природокористування полягає у формуванні відповідного узагальненого критерію  $F$  та виборі функцій близькості  $S$  і відповідності  $f$ , які визначаються характером завдання [3].

Принциповою методологічною відмінністю методу МБО від прогнозу покладів вуглеводнів на основі традиційних прямопошукових показників у вигляді аномалій типу покладів полягає в тому, що в разі МБО належність досліджуваної ділянки до певного класу замінюється неперервною функцією належності. Саме вона визначає міру відповідності досліджуваної ділянки параметрам ділянки як еталон. Як еталон вибирається близька за геологічними і фізико-географічними умовами ділянка з установленою промисловою нафтогазоносністю.

Зведемо початкову задачу до одноразової максимізації функції належності, яка являє собою лінійну згортку власних критеріїв мінус штраф за порушення обмежень:

$$F(a, b_c) = \sum_{j=1}^m \rho(a_i, b_{c_j}) f(a_j, b_{c_j}) - \sum_{b \notin a} \mu(a, b);$$

$$s(b_{j_r}, a_{j_l}) = \frac{|(a_{j_l} - b_{j_r})|}{|a_{j_l}|},$$

де  $f(a_j, b_{c_j}) = [1 - S(a_j, b_{c_j})]$  — функція відповідності, яка описує ступінь збігу значень порівнюваних величин;  $\rho(a_j, b_c)$  — ваговий коефіцієнт ознак

еталона, який відображає пріоритети інформативних ознак;  $\mu(a,b)$  — функція штрафу за те, що в досліджуваній ділянці наявні ознаки, які не належать даному еталону. Функція відповідності тим більша, чим менша різниця між значеннями інформативних ознак еталонної ділянки і характеристиками досліджуваної ділянки;  $S(a_j, b_{cj})$  — функція близькості, яка характеризує близькість окремих значень інформативних ознак досліджуваної ділянки до відповідних значень ознак віртуального еталона.

Функція близькості дорівнює нулю, якщо значення ознак досліджуваних ділянок вищі або дорівнюють значенням характеристик еталона. Функція штрафу дорівнює нулю, якщо в досліджуваній ділянці наявні ті і тільки ті ознаки, які є на еталонній ділянці, і зростає зі збільшенням кількості незбіжних ознак.

Як приклад на рис. 2 наведено результати міждисциплінарної оцінки нафтогазоперспективності ділянок Хухринсько-Чернетчинської площі, отриманих комплексуванням оцінок методами різних наукових дисциплін на основі адаптованого методу багатокритеріальної оптимізації з віртуальним еталоном [4].

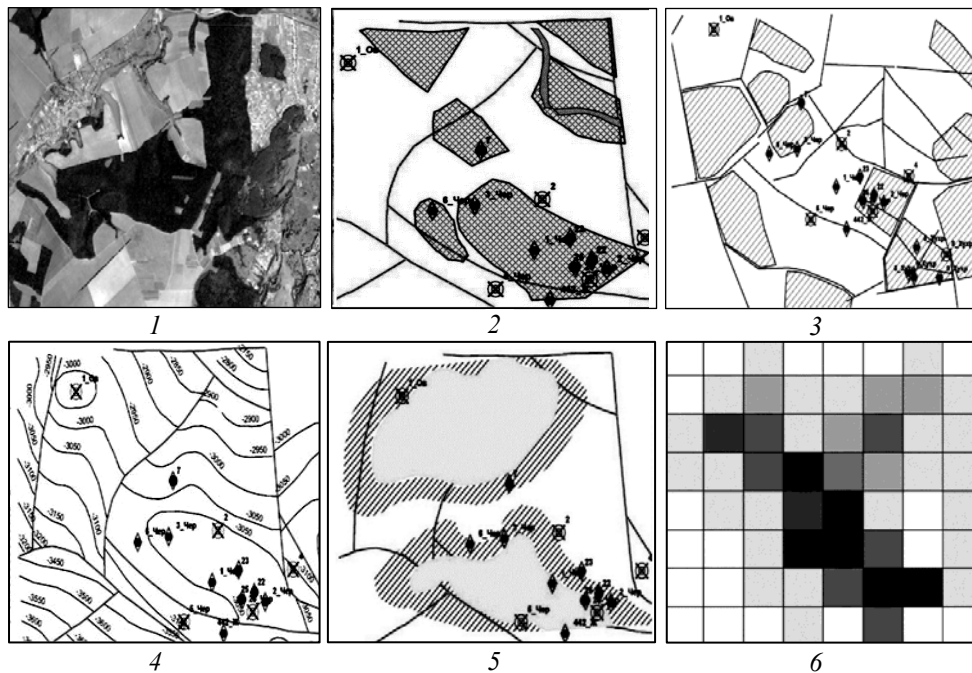


Рис. 2. Результати оцінювання нафтогазоперспективності ділянок Митяївської та Хухринсько-Чернетчинської площі, отриманих методами різних наукових дисциплін (спектрометричним 2, морфоструктурним 3, структурно-стратиграфічним 4, геохімічним 5); результат комплексування оцінок нафтогазоперспективності ділянок цієї території, поданих картою 6 у відносних градаціях яскравості (чорний колір відповідає максимальному значенню нафтогазоперспективності)

**Метод аналітичних мереж (МАН).** Цей метод модифікований для розв'язання природоресурсних і екологічних завдань в умовах відсутності еталонів. Вибір методу обумовлений тим, що МАН дозволяє обробляти більш різноманітні і складні структури з урахуванням залежності між рівнями і зворотними зв'язками між елементами рівнів, тим самим досягаючи більшої об'єктивності і достовірності в прийнятті рішень. Метод аналітич-

них мереж використовують для детального аналізу у випадках прийняття відповідальних рішень. У мережевих задачах компоненти розглядаються як взаємодійні об'єкти, які впливають один на одного щодо чітко сформульованого керувального критерію. Будь-який розв'язок в МАМ зображено у вигляді орієнтованої мережі [5].

Метод аналітичних мереж складається з декількох кроків.

**Крок 1.** Визначення експертами в предметній галузі пріоритетів, за якими оцінюватимуться досліджувані об'єкти. Оцінка проводилася за шкалою інтенсивності від 1 до 9, запропонованою Т. Сааті [6]. Формується мережева структура  $S^t = \{C_1^t, C_2^t, \dots, C_{N^t}^t\}$  критеріїв та факторів  $F_j^t, j = 1, \dots, N_f^t$  і альтернативних варіантів розв'язків  $A_i^t, i = 1, \dots, N_a^t$  у момент часу  $T^t \in T$ , де кластер  $C_i^t$  містить  $n_i^t$  елементів,  $C_i^t = \{x_{i1}^t, x_{i2}^t, \dots, x_{in_i^t}^t\}, i = 1, \dots, N^t$ . Для  $\forall C_i^t, C_j^t \in S$  задається значення функціонала впливу  $I^t : S^t \times S^t \rightarrow \{0,1\}$ :

$$I^t(C_i^t, C_j^t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_j^t, \\ 0, & \text{в іншому випадку,} \end{cases} \quad i, j = 1, \dots, N^t.$$

**Крок 2.** Будуються взаємозв'язки між критеріями та альтернативами і за кожним вносяться експертні оцінки. Для всіх кластерів  $C_i^t$  і  $C_j^t$  за умови, що  $I^t(C_i^t, C_j^t) = 1$ , будуються матриці попарних порівнянь елементів кластера  $C_j^t$  відносно  $p$ -го елемента кластера  $C_i^t$ .

Попарні порівняння кластерів проводилися за всіма критеріями керувальної ієрархії.

**Крок 3.** Розраховуються суперматриці і граничні матриці елементів взаємозв'язку. Для кожного узагальненого критерію будується суперматриця, у якій послідовно розміщуються всі кластери і елементи, що в них містяться, зверху вниз по вертикалі і зліва направо по горизонталі:

$$W = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j \\ C_1 & W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1j} \\ C_2 & W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_i & W_{i1} & W_{i2} & \dots & W_{ij} \end{matrix}$$

Елементи  $W_{ij}$  у суперматриці називаються блоками і являють собою матриці парних порівнянь,  $C_i, C_j$  — критерії,  $i, j = 1, 2, \dots, n$ .

**Крок 4.** Використовуючи стандартну адитивну (імовірнісну) формулу (additive (probabilistic)) з урахуванням узагальнених критеріїв і експертних оцінок за пріоритетами вибраних критеріїв на основі кінцевого ранжування об'єктів, отримують фінальні результати оцінки:

$$F_{A_i}^{Add} = \omega_B P_{A_i}^B + \omega_C (1 - P_{A_i}^C) + \omega_R (1 - P_{A_i}^R),$$



де  $\omega$  — вагові коефіцієнти;  $P$  — значення пріоритетів;  $A_j$  —  $i$ -а альтернатива, якщо  $i=1,2,\dots,n$ ;  $B$  — вигоди;  $C$  — затрати;  $R$  — ризики.

Модифікацію та адаптацію методу аналітичних мереж апробовано на конкретних природоресурсних та екологічних завданнях: оцінювання сільськогосподарських полів, ранжування стану міських районів та детальне оцінювання ділянок на нафтопродуктивність на суходолі та шельфі.

Як приклад подано аналітичну модель детального оцінювання і вибору найбільш нафтогазоперспективної ділянки з двох ділянок ( $A$  і  $B$ ), які отримали на першому етапі оцінювання найвищий бал за цільовою функцією належності  $F$  (рис. 3). Для визначення найбільш нафтогазоперспективної ділянки на основі МАМ проводиться структурування проблеми шляхом створення мережевої моделі, на основі якої визначаються взаємозв'язки між запропонованими альтернативами і узагальненими критеріями вибору.

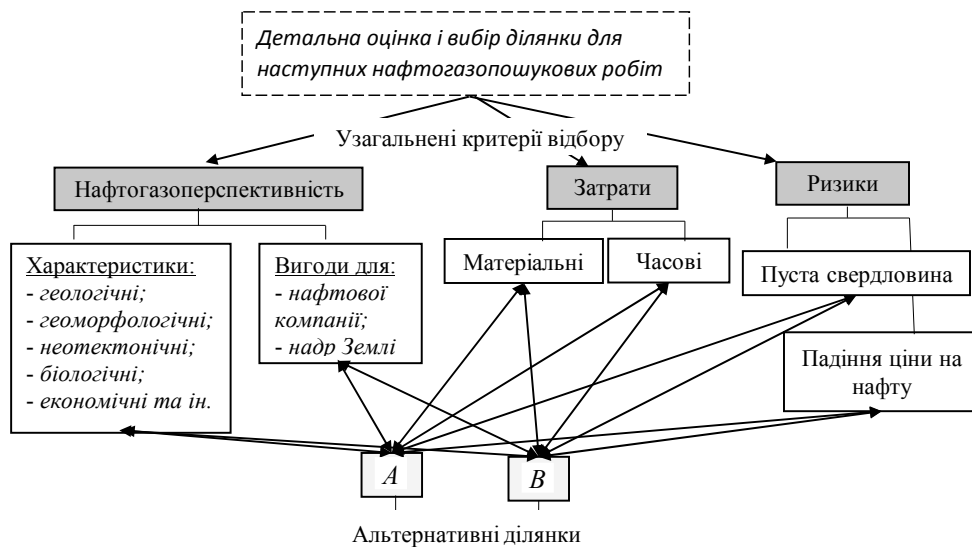


Рис. 3. Модель МАМ детального оцінювання і вибору (однієї з двох) ділянок території для подальших нафтогазоперспективних робіт

Вибір цього методу зумовлено тим, що МАМ дозволяє обробляти більш різноманітні і складні структури з урахуванням залежності між рівнями і зворотними зв'язками між елементами рівнів, тим самим досягаючи більшої об'єктивності і достовірності в прийнятті рішень. МАМ використовують для детального аналізу у випадках прийняття відповідальних рішень. У мережових задачах компоненти розглядаються як взаємодійні об'єкти, які впливають один на одного щодо чітко сформульованого керувального критерію. Будь-який розв'язок в МАМ подано у вигляді орієнтованої мережі, на відміну від методу аналізу ієрархій (МАІ), де потоки строго напрямлені зверху вниз.

**Метод фрактального аналізу.** Адаптований для оцінювання і прогнозу розвитку варіабельності різних складових природних систем. Фрактальний аналіз відкриває нові можливості для отримання об'єктивної геодинамічної інформації на основі реальних даних, оцінює зміну і структуру досліджуваного процесу або об'єкта, періодичність розподілу геометричних, фізичних та інших характеристик. Уведення мультифрактальних пара-

метрів дозволяє оцінити ступінь впорядкованості та стійкості системи до зовнішнього впливу, що неможливо визначити звичайними іншими статистичними методами. Як кількісну міру, яка описує структуру складових об'єкта, використовують фрактальну розмірність Реньї  $D_q$ , яка показує, наскільки щільно і рівномірно елементи даної множини заповнюють евклідовий простір. Значення  $D(q)$  — інваріантне до розміру вибірки, площі, масштабу [7].

Можливість використання фрактального аналізу для оцінювання варіабельності складових досліджуваного об'єкта встановлювалося перевіркою виконання двох умов: степеневу залежністю зростання компонентів статистичної суми  $Z_q$  від розміру вибірки  $N_i$  і не зростаючим видом функції спектра узагальнених розмірностей  $D_q$ , динаміка змін яких характеризує закономірності росту і еволюції процесу:

$$Z_q(N, q) = \sum_{i=1}^n p_i^q \propto N^{\tau(q)}, \quad p_i = \frac{N_i}{N}, \quad \sum_{i=1}^n p(i) = 1,$$

де  $N$  — загальний обсяг вибірки (загальна кількість складових на обраній площі);  $N_i$  — кількість  $i$ -го типу складових у вибраній площі  $N$ ;  $n$  — кількість усіх типів складових, кількість яких залежить від  $N$ ;  $p_i$  — імовірність належності даного типу складової у вибірці в  $i$ -му типі;  $q$  — ступінь моменту (статистичної суми), яка набуває цілочислових значень у діапазоні  $-q_{\max} < q < q_{\max}$ ,  $q_{\max} > 0$ .

$$\log[Z_q(N, q)] = \tau(q) \log N, \quad \tau(q) = \frac{\log[Z_q(N, q)]}{\log N} = \frac{\log \sum_{i=1}^n p_i^q}{\log N};$$

$$D_q = \frac{\tau(q)}{1 - q}, \quad q \neq 1, \quad \text{якщо } q \neq 1.$$

Функція  $D_q$  показує наскільки неоднорідним є розподіл складових урболандшафтах за типами і наскільки цей розподіл відрізняється від рівномірного. Функцію  $D_q$  називають спектром узагальнених розмірностей Реньї мультифрактала (Sala N., 2000). Якщо  $q \rightarrow +\infty$ , основний внесок забезпечують складові з найбільшими значеннями  $p_i$ , а якщо  $q \rightarrow -\infty$ , — з малими значеннями  $p_i$ , типи складових, які трапляються рідше. На практиці обмежуються розглядом десяткох значень цілих чисел  $q$ .

Як приклад, виконано оцінювання структури складових урболандшафту території міста Києва за період 1984–2013 рр. на основі космічної інформації дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і розробленої мультифрактальної моделі (рис. 4). Результати дослідження показали, що розвиток Києва відбувається за рахунок перетворення, ущільнення і більш раціонального використання внутрішньої структури складових без істотного розширення меж міської території, що незмінно позначається на екологічному стані міського середовища [8].

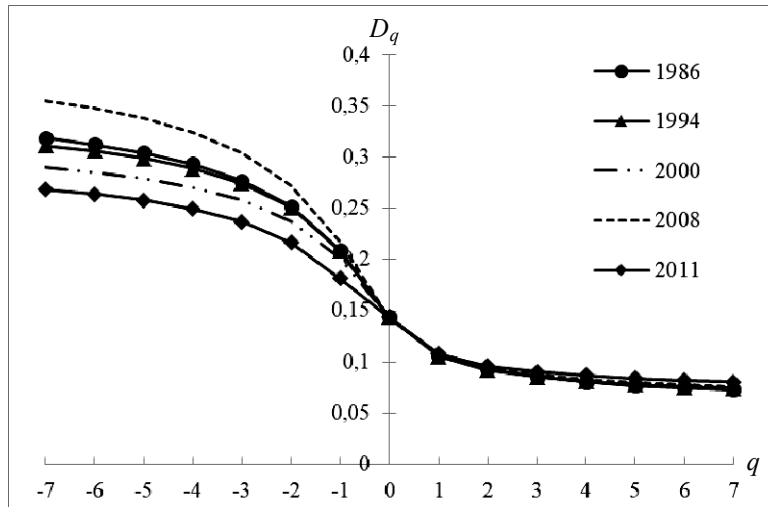


Рис. 4. Графіки залежності  $D_q$  від  $q$  за окремі роки спостережень

Із графіка (рис. 4) можна зробити висновок, що максимальна варіабельність за аналізований період часу виявляється за від'ємних значень  $q$  індексів  $D_q$ .

**Метод системної динаміки.** Цей метод модифікований асиміляцією космічної інформації ДЗЗ і доповнюванням рівняння для обчислення і моделювання прогнозування розвитку екологічного стану промислових територій запропонував Дж. Форрестор [9] для кількісного аналізу складних систем, що мають множинні внутрішні зв'язки між елементами (модулями) системи. Відмінністю методу є побудова динамічної моделі об'єкта керування на основі експертних даних і причинно-наслідкових відношень між модулями в модельній системі і на цій основі широка можливість моделювання процесу розвитку. Метод полягає в розробленні концептуальної моделі та формуванні математичної моделі, яку складають математичні рівняння, що описують баланс впливів у системі, заснований на причинно-наслідкових зв'язках у системі. При цьому вирішуються чотири типи завдань: аналізування і засвоєння інформації, прогнозування і планування. Завдання засвоєння інформації дозволяє оцінити параметри моделі і за даними спостережень відтворити її просторово-часову структуру. Завдання прогнозування мають стандартне формулювання і схему реалізації: за заданими значеннями вхідних параметрів. За допомогою моделей розраховуються функції стану, які характеризують поведінку системи у просторі та часі.

Формально математичний опис динаміки системних рівнів моделі зводиться до пов'язаної системи нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку вигляду

$$dx/dt = F(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t), \rightarrow \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0,$$

де  $\mathbf{x}(t)$  — вектор-функція рівнянь (змінних стану);  $\mathbf{p}(t)$  — вектор-функція параметрів системи;  $F(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t)$  — нелінійна в загальному випадку нестационарна вектор-функція, яка в переважній більшості випадків являє собою

різницю між темпами (потоками, швидкостями) позитивних і негативних зворотних зв'язків;

$$F(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t) = f^+(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t) - f^-(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t),$$

де  $f^+(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t)$  — швидкості додатних зворотних зв'язків, які містять фактори, що зумовлюють зростання змінної  $\mathbf{x}$ ;  $f^-(\mathbf{x}(t), \mathbf{p}(t), t)$  — швидкості від'ємних зворотних зв'язків, які містять фактори, що зумовлюють зменшення змінної  $\mathbf{x}$ .

Даний метод апробовано на території міста Києва для комплексного оцінювання стану міського середовища з урахуванням соціальних, економічних та екологічних показників [10]. У результаті отримано інтегральний показник стану довкілля міста  $F$  та прогнозу картину до 2025 р. (рис. 5).

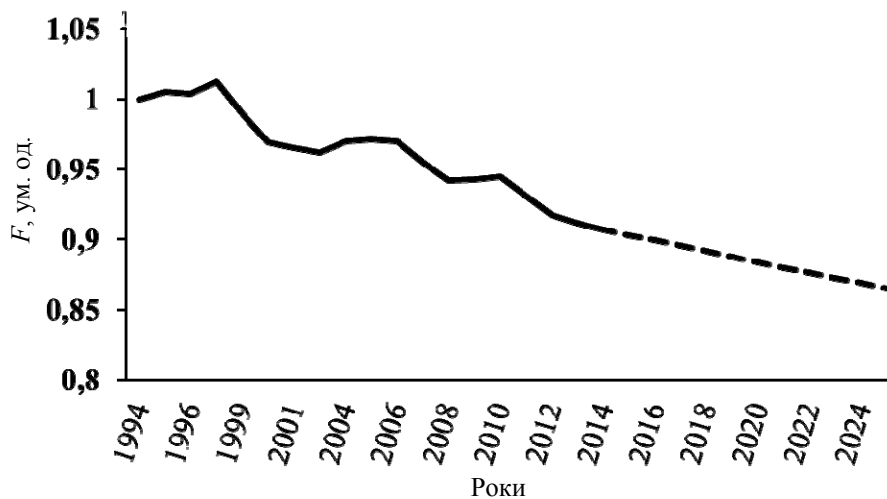


Рис. 5. Результати моделювання стану довкілля міста Києва (суцільна лінія) та прогнозна оцінка (пунктирна лінія)

**Структурно-текстурний аналіз.** Цей аналіз адаптовано до дешифрування космічних знімків природних і техногенних ландшафтів та об'єктів. За простотою і компактністю описів структурно-текстуровані ознаки значно перевершують морфологічні ознаки; їх можна порівняти з інваріантами моментів або стохастичними інваріантами. Текстурні характеристики, незважаючи на сезонну погоду мінливість, зберігають якісну і кількісну оцінку протягом усього часу [11]. Текстура виражається оцінками статистик енергетичних і просторово-енергетичних розподілів (амплітудних і амплітудно-фазових ознак), автокореляційних і взаємкореляційних функцій (кореляційних ознак), спектрів просторових частот (спектральних ознак) або геометричних і енергетичних параметрів Реона — локальних ознак. В основу текстурних ознак покладено поняття текстури — найважливішої характеристики зорових моделей зображень.

Під час дешифрування космічних зображень ландшафтних зон за структурно-текстурованими ознаками зображення досить точно апроксимуються експонентними функціями. Це дозволяє як стохастичну модель зображень

використовувати випадковий двовимірний марковський процес. Математичною формою опису марковської моделі зображення є матриця суміжних імовірностей значень яскравості космічного знімка.

Найчастіше у практиці ДЗЗ застосовують такі текстурні перетворення:

— лінійні ортогональні перетворення: Фур'є, Адамара, Хаара та ін. Текстурованим спектром є відповідно спектр Фур'є, Адамара, Хаара та ін., а текстурною частотою — його двовимірний аргумент;

— автокореляційні перетворення. Текстурованим спектром є автокореляційна функція, а текстурною частотою — двовимірне зміщення;

— перетворення до гістограми. Текстурованим спектром є гістограма яскравості, а роль одновимірної текстурної частоти виконує значення яскравості. Зазвичай використовуються похідні текстурні ознаки (наприклад, середнє, дисперсія).

Як інформативні текстурні характеристики зображень перевірено кілька десятків різних параметрів Хараліка [12] і обрано для подальшого використання п'ять найбільш інформативних з них (*Contrast, Sum Variance, Sum Entropy, Entropy, Difference Entropy*) як для пошуку вуглеводнів, так і для виявлення аномалій природного і техногенного походження.

Одним з інформативних ознак СТА є просторово-частотний спектр (ПЧС). Як ПЧС найчастіше використовується двовимірний спектр Фур'є. Складові ПЧС  $C(n, m)$  обчислюються за методом дискретного двовимірного перетворення Фур'є відповідно до виразу [13]

$$C(n, m) = \frac{1}{A \cdot B} \sum_{x=0}^{A-1} \sum_{y=0}^{B-1} D(x, y) \cdot \exp - [(nx / A) + (my / B)],$$

де  $n, m$  — номери просторових гармонік по осях  $X, Y$ ;  $x, y$  — номери пікселів у межах виділеного фрагмента по осях  $X, Y$ ;  $L(x, y)$  — розподіл яскравості в зображенні;  $A, B$  — кількість відліків по осях  $X, Y$ .

Для визначення напрямку лінійних елементів зображення використовується залежність нормованої азимутальної спектральної густини (АСГ) енергетичного спектра від кутового напрямку  $\Theta$ . Обчислюється АСГ за формулою [13]

$$S(\Theta) = \int_0^{\Theta + \Delta\Theta/2} \int_{\Theta - \Delta\Theta/2}^{\Theta + \Delta\Theta/2} S(\Theta, r) dr d\Theta,$$

де  $S(\Theta, r)$  — значення енергетичного спектра зображення в точці  $(\Theta, r)$ ;  $\Theta = \arctg(N_y / N_x) + \pi/2$  — кут напрямку двовимірної частоти в полярних координатах, зміщений на  $90^\circ$ ;  $N_x, N_y$  — проекції двовимірної частоти просторового спектра на осі  $X, Y$  відповідно;  $r = \sqrt{N_x^2 + N_y^2}$  — модуль просторової частоти або її радіус у полярних координатах.

На прикладі Дніпра і Дунаю наведено результати оцінювання динаміки змін руслових гирлових потоків на основі методу АСГ (рис. 6) [13].

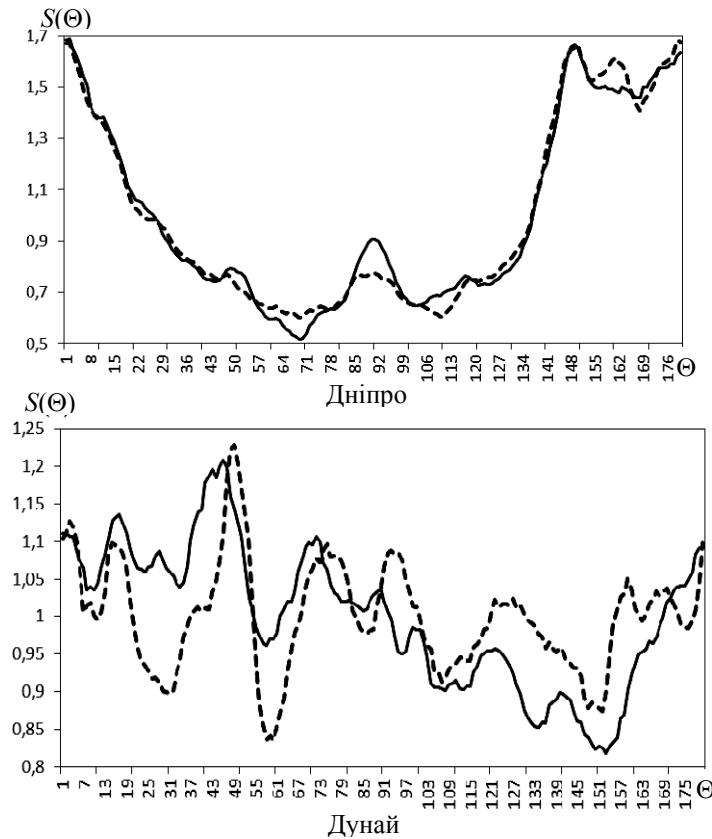


Рис. 6. Оцінювання динаміки змін руслових гирлових потоків за 1986–2015 рр.

На відміну від Дніпра АСГ Кілійського гирла Дунаю за 2015 р. значно змінилася порівняно з 1986 р. як щодо зменшення інтенсивності, так і азимутального розташування піків ПЧС.

## ВИСНОВКИ

На основі викладеного матеріалу обґрунтовано можливості та доцільність застосування методичних засобів системного аналізу до розв’язання природоресурсних і екологічних завдань для забезпечення раціонального природокористування та відновлення навколишнього природного середовища. Створення на цій основі методології дозволить значно розширити функціональні можливості і підвищити ефективність аерокосмічного геомоніторингу.

Розглянуті методи далеко не вичерпують можливості системного аналізу; це лише деяка частина його математичного арсеналу, яка освоєна у відділі системного аналізу ЦАКДЗ для вирішення конкретних тематичних завдань природокористування та екології на основі матеріалів аерокосмічного знімання, і може мати продовження.

## ЛІТЕРАТУРА

1. В.И. Лялько, и др., “Использование данных спутниковой съемки для изучения природоресурсных проблем”, *Космічні дослідження в Україні 2002–2004*, Київ, 2004, с. 7–14.

2. A.I. Arkhipov, N.M. Glazunov, and A.V. Khyzhnyak, "Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness", *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 54, issue 1, pp. 94–98, 2018. doi: 10.1007/s10559-018-0010-7
3. А.Д. Федоровский, Л.Ф. Даргейко, В.П. Зубко, и В.Г. Якимчук, "Системный подход к оценке эффективности аппаратных комплексов дистанционного зондирования Земли", *Космична наука і технологія*, т. 7, № 5–6, с. 75–79, 2001.
4. А.В. Хижняк, Т.А. Єфіменко, О.І. Архіпов, О.В. Томченко, К.Ю. Суханов, и О.Д. Федоровський, "Евристичні методи оцінки нафтогазоперспективності ділянок досліджуваної території на основі міждисциплінарної інтеграції аерокосмічної і наземної інформації (на прикладі Дніпровсько-Донецької западини)", *Український журнал дистанційного зондування Землі*, № 9, с. 24–28, 2016.
5. Т. Саати, *Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети*. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.
6. Т. Саати, *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. Москва: Радио и связь, 1993.
7. Б. Мандельброт, *Фрактальная геометрия природы*. Москва–Ижевск, 2010.
8. А.В. Соколовська, "Мультифрактальний аналіз варіабельності структури складових міських територій на основі космічної інформації ДЗЗ (на прикладі міста Києва за 1986–2011 рр.)", *Доповіді Національної академії наук України*, №12, с.187–194, 2013.
9. J.W. Forrester, "Counterintuitive behavior of social systems", *Technology Review*, vol. 73, pp. 52–68, 1971.
10. А.В. Соколовська, О.В. Нікітенко, и О.Д. Федоровський, "Системне моделювання і прогноз стану довкілля міста Києва на основі статистичних даних космічного геомоніторингу і наземних спостережень", *Системні дослідження та інформаційні технології*, № 4, с. 60–68, 2014.
11. А.Д. Федоровский, В.Г. Якимчук, С.А. Рябоконеко, И.П. Пахомов, и К.Ю. Суханов, "Дешифрирование космических снимков ландшафтных комплексов на основе структурно-текстурного анализа", *Космична наука і технологія*, т. 8, № 2/3, с. 76–83, 2002. Доступно: <https://doi.org/10.15407/knit2002.02.076>
12. R.M. Haralick, "Statistical and structural approaches to texture", *Proc. IEEE*, vol. 67, no. 5, pp. 786, 1979.
13. О.Д. Федоровський та ін., "Космічний моніторинг водних потоків гірлових об'ластей річок (на прикладі Дніпра та Дунаю)", *Космична наука і технологія*, т. 23, № 2, с. 11–16, 2017. Доступно: <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.011>

Надійшла 25.07.2020

#### INFORMATION ON THE ARTICLE

**A.V. Khyzhniak**, ORCID: 0000-0002-8637-3822, State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine", e-mail: [avsokolovska@gmail.com](mailto:avsokolovska@gmail.com).

**O.D. Fedorovsky**, ORCID: 0000-0003-3611-546X, State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine", e-mail: [adfedorovsky@ukr.net](mailto:adfedorovsky@ukr.net).

#### METHODOLOGICAL APPROACHES OF SYSTEM ANALYSIS AS COMPONENTS OF THE METHODOLOGY OF AEROSPACE GEOMONITORING FOR SOLVING NATURAL RESOURCES MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS / A.V. Khyzhniak, O.D. Fedorovsky

**Abstract.** The possibility of using some of the developed, modified, and adapted methodological tools of system analysis as components of the methodology of aerospace geomonitoring for solving environmental and ecological problems is shown. The above methods, namely: statistical criterion method, multicriteria optimization method, analytical networks method, system dynamics method, fractal, and structural-texture analysis method. These methods are illustrated with specific examples of solving thematic problems, which, together with systematic, interdisciplinary, and structuring principles, are based on the methodology of aerospace geomonitoring for sustainable nature management and restoring the natural environment.

**Keywords:** methods, models, system analysis, aerospace geomonitoring, interdisciplinarity, structuring, Earth remote sensing.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА КАК СОСТАВЛЯЮЩИЕ МЕТОДОЛОГИИ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ГЕОМОНИТОРИНГА РЕШЕНИЯ ПРИРОДОРЕСУРСНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ / А.В. Хижняк, А.Д. Федоровский**

**Аннотация.** Показана возможность использования некоторых разработанных, модифицированных и адаптированных методических средств системного анализа как составляющих методологии аэрокосмического геомониторинга для решения природоресурсных и экологических задач, а именно это методы: статистического критерия, многокритериальной оптимизации, аналитических сетей, системной динамики, фрактального и структурно-текстурного анализа. Приведенные методы иллюстрируются конкретными примерами решения тематических задач, которые наряду с принципами системности, междисциплинарности и структуризации являются основой методологии аэрокосмического геомониторинга рационального природопользования и восстановления окружающей среды.

**Ключевые слова:** методы, модели, системный анализ, аэрокосмический геомониторинг, междисциплинарность, структурирование, дистанционное зондирование Земли.

**REFERENCES**

1. V.I. Lyalko and et al., "Using satellite data to study natural resource issues ", *Space Research in Ukraine, 2002–2004*, Kyiv, pp. 7–14, 2004.
2. A.I. Arkhipov, N.M. Glazunov, and A.V. Khyzhnyak, "Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness", *Cybernetics and Systems Analysis*, vol. 54, issue 1, pp. 94–98, 2018. doi: 10.1007/s10559-018-0010-7.
3. A.D. Fedorovsky, L.F. Dargeyko, V.P. Zubko, and V.G. Yakimchuk, "A system approach to the estimation of the efficiency of hardware complexes for remote earth sounding", *Space Science and Technology*, vol. 7, no. 5–6, pp. 75–79, 2001. Available: <https://doi.org/10.15407/knit2001.05.075>.
4. A. Khizhnyak, T. Yefimenko, A. Arkhipov, O. Tomchenko, K. Sukhanov, and O. Fedorovsky, "Heuristic methods of assessment of sites within oil and gas prospective areas based on interdisciplinary integration of aerospace and surface information (as exemplified by the Dnieper-Donetsk basin)", *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, no. 9, pp. 24–28, 2016.
5. Thomas L. Saaty, *Decision making with dependence and feedback. The analytic process*. Moscow: LKI Publishing House, 2008.
6. Thomas L. Saaty, *Making decisions. Method of hierarchy analysis*. Moscow: Radio and svyaz', 1993.
7. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*. Moscow: Institute for Computer Research, 2002.
8. A.V. Sokolovska, "Multifractal analysis of a variability of the structure of urban areas components based on the information remotely sensed from space (the case of Kyiv from 1986 till 2011)", *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 12, pp. 187–194, 2013.
9. J.W. Forrester, "Counterintuitive behavior of social systems", *Technology Review*, vol. 73, no. 3, pp. 52–68, 1971.
10. A.V. Sokolovska, O.V. Nikitenko, and O.D. Fedorovsky, "System modeling and forecast of environmental conditions of Kyiv based on statistical data of space monitoring and ground-based observations ", *System Research & Information Technologies*, no. 4, pp. 60–68, 2014.
11. O.D. Fedorovsky, V.G. Yakimchuk, S.A. Ryabokononko, I.P. Pakhomov, and K.Yu. Sukhanov, "Interpreting space images of landscape systems on the basis of structural analysis" *Space Science and Technology*, vol. 8, no. 2–3, pp. 76–83, 2002. Available: <https://doi.org/10.15407/knit2002.02.076>
12. R.M. Haralick, "Statistical and structural approaches to texture", *Proc. IEEE*, vol. 67, no. 5, pp. 786, 1979.
13. O.D. Fedorovsky and et al., "Space monitoring of water stream in estuarial areas (by the example of the Dnieper and the Danube)", *Space Science and Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 11–16, 2017. Available: <https://doi.org/10.15407/knit2017.02.011>.



## РОЗПІЗНАВАННЯ ЛЮДСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОРТАТИВНИХ НАТІЛЬНИХ ДАТЧИКІВ

Р.В. КИСЛИЙ, А.І. ПЕТРЕНКО

**Анотація.** Досліджено системи розпізнавання людської діяльності (HAR) за допомогою систематизації типів натільних датчиків для HAR та розглянуто методи збору даних з цих датчиків. Описано модель процесу реалізації HAR та ретельно проаналізовано кожний компонент процесу розпізнавання. Запропоновано методи ідентифікації людської діяльності для різних видів діяльності і визначено їх сильні і слабкі сторони. Виконано порівняльний аналіз цих методів. Процес пошуку тимчасових збігів подано у вигляді діаграми з детальним поясненням кожного переходу. На основі виконаного аналізу запропоновано поєднання як алгоритмів, так і методів, що сприятимуть підвищенню ефективності системи розпізнавання людської діяльності в цілому.

**Ключові слова:** розпізнавання людської діяльності, класифікація, відстеження, ідентифікація.

### ВСТУП

Потреби в розумінні людської діяльності останнім часом неухильно зростають у сфері охорони здоров'я, особливо в організації допомоги літнім людям, реабілітаційній допомозі при цукровому діабеті, розладах при когнітивних захворювань, а також в поліпшенні життя та підтримання благоустрою. Значний обсяг ресурсів буде збережений, якщо датчики зможуть допомогти реєстраторам контролювати пацієнтів безперервно і звітувати автоматично в разі виявлення будь-якої ненормальної поведінки. Для зменшення навантаження на систему і в той же час збільшення кількості людей, за якими ведеться медичне спостереження, останнім часом активно розвивається телемедицина. Телемедицина — використання електронних інформаційних та телекомунікаційних технологій для допомоги і консультування пацієнтів на відстані [1, 2]. Відповідно телемедицина вимагає також можливості отримувати дані про стан пацієнта онлайн, що, у свою чергу, робить необхідним розвиток HAR.

Багато років основними методами комунікації між клінікою та пацієнтами були текстові та графічні інтерфейси. Розпізнавання стану пацієнта в режимі реального часу може це змінити. Тому системи, які збирають дані

про пацієнта за допомогою датчиків, є перспективним напрямом розвитку інтерфейсів взаємодії для телемедицини.

Системи, що забезпечують роботу телемедицини, можна розбити на критичні та некритичні. Але в обох категоріях важливою частиною таких систем є отримання і аналіз даних з натільних датчиків. Багато таких систем створено за принципом «сповіщення за фактом». Наприклад, прилади з натільними датчиками, які кількісно оцінюють фізичну активність, можуть використовувати пацієнти із хронічними порушеннями легень для підтримання рівня їх активності, оскільки бездіяльність погіршує їх стан. Що стосується можливих застосувань не в медицині, то натільні датчики можуть використовуватися для моніторингу фізичних навантажень професійними спортсменами для підвищення ефективності їх тренувань [3].

Таким чином, в умовах сучасного розвитку інформаційних технологій HAR ефективно застосовується як інтерфейс між людьми і комп'ютерами вже протягом тривалого періоду часу. Крім опису ряду важливих технологій і алгоритмів HAR, перспективним є дослідження HAR і вивчення можливості застосування HAR у взаємодії людини з роботою, комп'ютером, роботизованою системою. У моделі HAR для взаємодії людини і складного комп'ютеризованого агрегату є чотири основні технічні компоненти:

- 1) сенсорні технології;
- 2) ідентифікація людської діяльності;
- 3) відстеження людської діяльності;
- 4) класифікація людської діяльності.

Наведемо визначення проблеми HAR: якщо дано набір вимірів  $S$  такий, що  $S = \{S_0, \dots, S_{k-1}\}$ , де  $k$  — кількість вимірів, кожен з яких виконано в інтервалі  $I = [t\alpha, t\omega]$ , то мета — найти відповідне  $I$  з набору значень станів  $I = [I_0, \dots, I_r]$ , базуючись на даних із  $S$ . Причому в кожний момент часу може розглядатися лише один стан  $I$  (наприклад, людина не може бігти і сидіти одночасно) [5].

Згідно з визначенням HAR включає в себе вивчення рухів людини. Рух людини — це складна функція, на яку впливає безліч факторів, включаючи фізіологічні, анатомічні, психологічні та соціальні ефекти [3], тому самі рухи можна розбити на великі підгрупи (табл. 1).

**Таблиця 1.** Типи активностей, які можуть розпізнаватися найсучаснішими HAR системи

Група	Активності
Пересування	Ходьба, біг, сидіння, лежання, підймання сходами, спускання сходами, їзда в ліфті тощо
Рутинні активності	Приймання їжі, пиття, робота за ПК, читання, чищення зубів, розтягування, прибирання тощо
Вправи	Веслування, підняття ваги, нордична ходьба, віджимання і т.ін.

Різні рухи мають різні складність і точність розпізнавання. Наприклад, ходьбу, біг або спокій простіше відрізнити ніж складніші рухи на зразок жу-

вання, вставання з місця чи конкретного помаху рукою. Для розпізнавання цих рухів використовуються системи натільних датчиків, які кріпляться в різних місцях: на поясі, на грудях, на зап'ясті тощо.

Відповідно в різних системах використовують різні сенсори. Найчастіше використовують такі.

- *Акселерометри* — вимірюють прискорення вздовж осей. Оскільки вони вимірюють прискорення за рахунок сили тяжіння та руху, фактичну складову прискорення, пов'язаного з рухом, потрібно відокремити від гравітаційної. Існує кілька типів акселерометрів, що базуються на п'єзоелектричних, п'єзорезистивних або варіативних способах трансдукції. Усі вони використовують один і той же принцип роботи маси, яка реагує на прискорення,

- *Гіроскопи* — вимірюють кутову швидкість, використовуючи ефект Коріоліса.

- *Магнетометри* — можуть бути застосовані для вимірювання орієнтації фрагмента тіла відносно магнітного полюса Землі, використовуючи електромагнітну індукцію.

- *Датчики тиску* — оцінюють розподіл тиску на планку (наприклад стопи, чи іншої частини тіла). Вони часто реалізуються за допомогою резистивних або ємнісних тензодатчиків.

- *Актометри* — зазвичай прикріплюються до кінцівок людини, щоб виміряти величину механічних рухів. Отриманий вихід є вимірюванням «одиниць актометра» за відомий проміжок часу; це дає змогу оцінити загальні витрати енергії [3].

Розташування датчиків на корпусі дуже залежить від того, які рухи потрібно вимірювати. Наприклад, зап'ястя може бути ідеальним місцем для спостереження за тремором, пов'язаним із хворобою Паркінсона, але це не найкраще місце для вимірювання загальних рухів людини [4]. Проте акселерометр, закріплений на поясі, добре вимірює загальні рухи (наприклад, ходьбу чи біг) і зовсім не підходить для спостереження за хворобою Паркінсона.

Багато засобів, притаманних HAR, застосовують техніки комп'ютерного зору та оброблення зображень [5]. Для цього потрібні камери і присутність людини в зоні спостереження. Розвиток мобільних технологій і вдосконалення технологічних процесів ведуть до зменшення розмірів і збільшення потужності мобільних пристроїв, появи переносної електроніки, оснащеної різними датчиками.

До датчиків, що необхідні для техніки комп'ютерного зору, належать чотири категорії датчиків: камера, маркер, стереокамера, сенсор глибини. У маркерному підході датчиком є оптична камера. У більшості рішень на основі маркерів користувачам необхідно носити видимі маркери [6], які збирають інформацію та передають її класифікаторам. Застосування камер для HAR почалося на початку 90-х років [7]. Недоліком однокамерного підходу є обмеження кута огляду, що впливає на надійність системи [7]. Однак у недавніх дослідженнях застосовувався однокамерний підхід до високошвидкісного HAR [8]. Система використовує датчик швидкості і спеціально розроблений процесор візуальних обчислень для досягнення високошвидкісного розпізнавання рухів людини. Стереокамера застосовується для надійного HAR за допомогою 3D-зору. Стереокамера використовується як дода-

ток, що містить дві оптичні камери для створення інформації про глибину 3D. Недоліком застосування стереокамер є складність обчислень і труднощі з калібруванням [8]. Перспективним інноваційним надбанням сьогодення є датчик глибини, який визначається як монодатчик. Монодатчики глибини мають ряд переваг порівняно з традиційними стереокамерами, головними з яких є безпроблемне налаштування калібрування і невибагливість до умов освітлення [9]. Крім того, вихідною інформацією датчика глибини є інформація про глибину 3D. Порівняно з інформацією про колір інформація про глибину 3D спрощує проблему HAR [8]. Існує два типи загальних не стереодатчиків глибини: камера з «часом прольоту» (ToF) і Microsoft Kinect (або аналогічні ІК-датчики). Основним принципом камер ToF є визначення часу проходження світла [1]. Перевагою камер ToF є більш висока частота кадрів. Обмеження камери ToF полягає в тому, що щільність камери сильно залежить від її світлочутливості та рефлексії [6]. Microsoft Kinect надає більш доступне рішення для розпізнавання жестів. Kinect — інфрачервоний датчик глибини.

Можливості застосування різних методів розпізнавання жестів руки в реальному часі як керування різними системами і пристроями наводять Н.О. Кулішова, Д.А. Авдєєв [28]. У праці проаналізовано сучасні методи розпізнавання жестів руки в реальному часі й оцінено можливості їх застосування в керуванні системою розумного будинку.

В.В. Савінова та В.О. Колесніков [9] розкрили сутність застосування методів комп'ютерного зору в автомобільній індустрії, детально описали методи компанії Itseez. Itseez веде діяльність у восьми напрямках: системи автомобільної безпеки на основі комп'ютерного зору; 3D (стерео, реконструкція, структурне підсвічування); розпізнавання сцен, виявлення / класифікація об'єктів; доповнена реальність; розпізнавання жестів; реконструкція скелета; глибоке / машинне навчання; згорткові нейронні мережі.

## **ПРОЦЕС HAR**

Проектування будь-якої системи HAR залежить передусім від активностей, які необхідно розпізнати. Зі зміною множини станів зразу виникає необхідність у перетренуванні моделей розпізнавання [10]. Тому будь-який проект HAR складається з таких стадій [11]:

- визначення активностей, які мають бути розпізнані;
- збирання даних із сенсорів;
- початкове оброблення даних та генерація ознак;
- створення моделі класифікації діяльності.

Стадії функціонування HAR системи показано на рис. 1. Навчальний етап спочатку вимагає збирання даних — створення датасету з часових рядів для всіх осіб і для кожної діяльності, що розпізнається. Часові ряди розділяються, використовуючи вікна, щоб вилучити ознаки, тим самим відфільтровуючи корисну інформацію з початкових сигналів. Після цього створений датасет використовується для навчання моделей розпізнавання активностей. Так само для тестування дані збираються під час часового вікна з окремої людини, виміри даних з якої не входять у навчальний датасет.

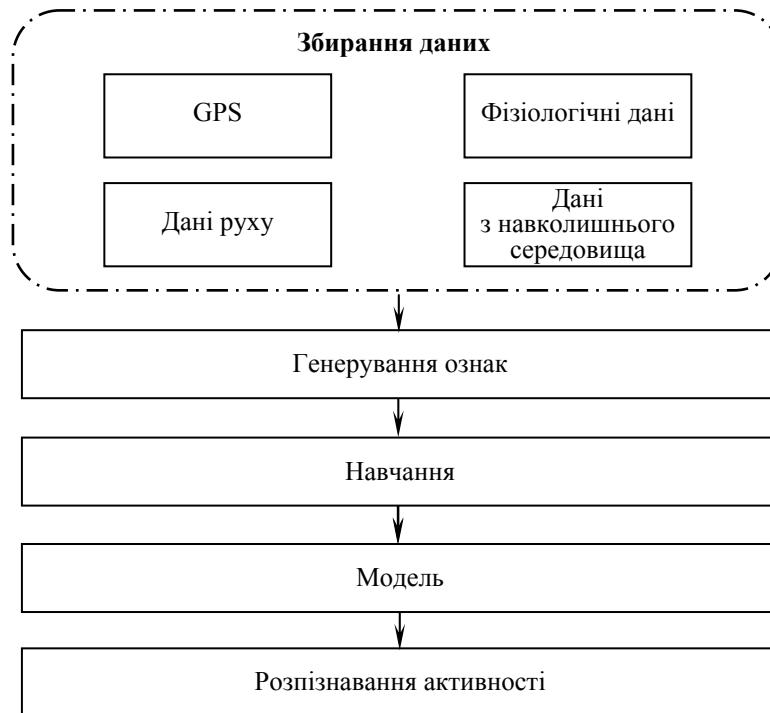


Рис. 1. Загальна діаграма процесу в HAR системі [11]

Загальну схему збирання даних для систем HAR зображено на рис. 2.

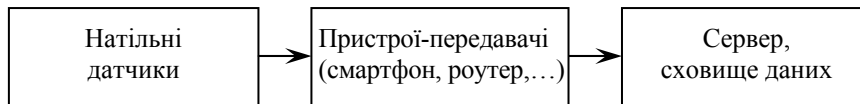


Рис. 2. Загальна схема збирання даних для HAR

Натільні датчики, прикріплені до тіла людини, насамперед вимірюють такі атрибути, як рух [4], розташування, температура, ЕКГ [12]. Ці датчики повинні спілкуватися з інтеграційним пристроєм (ID), який може бути мобільним телефоном [13], ноутбуком або спеціалізованою вбудованою системою [14]. Основна мета — попереднє оброблення даних, отриманих від датчиків, а в деяких випадках надсилання їх на сервер для моніторингу, візуалізації та /або аналізу в режимі реального часу [13]. Протокол зв'язку може бути UDP / IP або TCP / IP, GPRC чи інший, відповідно до бажаного рівня надійності [10].

Таким чином, основні виклики, які стоять перед HAR системами, такі ж як і для будь-яких натільних real-time систем:

- вибір даних, які вимірюються;
- вибір ознак з отриманих даних;
- протокол спілкування між датчиками та серверною частиною;
- точність розпізнавання;
- споживання енергії;
- гнучкість.

### Вибір даних, які вимірюються

Дані, які вимірюються натільними датчиками, можна поділити на групи: зовнішні (дані із середовища), дані руху, фізіологічні дані.

- Зовнішні дані (дані із середовища) — це незалежні від людини показники навколишнього середовища (температура, вологість, швидкість вітру і т.ін.).
- Дані руху — вимірюються натільними датчиками, такими як акселерометр. У даний вид вимірів входять рухи — ходьба, біг тощо.
- Локація — дані, зібрані за допомогою GPS.
- Фізіологічні сигнали — пульс, дихання, температура тіла тощо.

#### Протокол спілкування між датчиками та серверною частиною.

Важливою частиною системи HAR є протокол спілкування між датчиками та серверною частиною. Такий протокол має бути надійним, оскільки пропущені дані можуть відчутно впливати на точність результату. Наприклад, у 1999 р. F. Foerster, M. Smeja, J. Fahrenberg [15] продемонстрували 95,6% точності для амбулаторних заходів у контрольованому експерименті збирання даних, але у природних умовах (тобто поза лабораторією) точність знизилася до 66%.

**Точність розпізнавання.** Оскільки одні активності розпізнати значно простіше ніж інші, то необхідно визначити метрики, якими буде вимірюватися точність розпізнавання активності.

**Споживання енергії.** Оскільки натільні датчики не повинні створювати незручностей людині, то вони мають мати автономне джерело енергії. Ураховуючи їх розміри, це джерело має бути невеликим за розмірами. У HAR системах здебільшого використовуються мережі малого радіуса дії (Wi-Fi, Bluetooth), що також накладає певні обмеження на споживання енергії.

**Гнучкість.** Оскільки люди проявляють діяльність по-різному (через вік, стать, масу тощо), для кожної людини може бути побудована конкретна модель розпізнавання [16]. Так як це неможливо, то система має бути гнучкою до різних проявлень однієї і тієї ж діяльності. Такої гнучкості можна досягти, використовуючи або багато даних для тренування моделі, або нормуючи значення оброблених сигналів.

### МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ СИСТЕМИ HAR

Під час збирання даних необхідно зібрати якомога більше вимірювань з різних людей. При цьому можуть використовуватися різні датчики, які записують свої покази синхронно і одночасно.

З аналізу сирих даних необхідно вилучити ознаки і виділити ті з них, які допомагають класифікувати активності. Оброблення зібраних даних, так само як і генерація ознак, відбувається окремо для кожного датчика. Наприклад, для акселерометра, який вимірює прискорення вздовж трьох осей, покази трансформуються в одне значення  $a$  :

$$a = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} .$$

Так само нормалізуються і покази інших датчиків. Також для генерації ознак використовуються багато інших технік і метрик. Наприклад, у праці [17] використано середні, дисперсійні, енергетичні та енергетичні коефіцієнти дискретної трансформації Фур'є (DFT). Усі нові ознаки, які створюються під час оброблення початкових даних, потім використовуються в моделях класифікації.

Оскільки кожен набір даних демонструє різні характеристики та ознаки, які можуть бути корисними або ні для конкретного методу розпізнавання, то дуже важливо вибрати такі ознаки та методи, які будуть давати найбільшу точність. Для кількісного розуміння ефективності розпізнавання використовуються стандартні метрики, наприклад, точність, recall, precision, F-метрика, ROC та ін.

Найбільш уживані методи для розпізнавання наведено в табл. 2. Також наведено визначення деяких найбільш широко використовуваних ознак [18] сигналу  $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$ .

**Таблиця 2.** Групи ознак, які можна виділити з даних носієвих датчиків

Група	Метод
Часові ряди	Середнє, середнє відхилення, дисперсія, міжквартильний діапазон (IQR), середнє абсолютне відхилення (MAD), кореляція між осями, ентропія [19]
Частотні перетворення	Фур'є-трансформація (FT) [20] Дискретне косинусне перетворення (DCT) [20]
Інші методи	Основний компонентний аналіз (PCA) [20], лінійний дискримінантний аналіз (LDA) [18]

*Вибір довжини вікна:* поділ вимірюваного часового ряду на часові вікна є зручним рішенням для оброблення числових рядів. При цьому ключовим фактором є вибір довжини вікна. Наявність досить коротких вікон може підвищити продуктивність системи, утім зменшить можливість розпізнавання складніших патернів (короткі вікна можуть не надати достатньої інформації для повного опису виконуваної діяльності). І навпаки, якщо вікна занадто довгі, в одному часовому вікні може бути більше ніж одна активність [20]. У літературі використовуються різні довжини вікон: 0,08 с, 1 с, 1,5 с, 3 с, 5 с [21]. Зазвичай це рішення зумовлюється визнанням діяльності та вимірюваними ознаками. Наприклад, для сигналу частоти серцевих скорочень потрібні вікна 30 с [22]. Натомість для таких заходів, як ковтання, були застосовані вікна 1,5 с. Часові вікна також можуть або перекриватися [22], або неперервно йти один за одним [17, 18]. Вікна, що перекриваються, призначені для більш точного керування переходами між інтервалами.

Однак питання дослідження систем HAR за допомогою різних датчиків з подальшим їх упровадженням залишається відкритим і потребує додаткового опрацювання із систематизацією типів датчиків для HAR та методів збирання даних.

### **Навчання моделей розпізнавання**

Не зважаючи на те, що останнім часом з розвитком технологій збирати дані стало значно простіше, основні виклики для систем HAR становить розу-

міння контексту. Для цього використовуються моделі машинного навчання, які інтерпретують зібрані дані і прогнозують діяльність.

Для навчання моделі використовується навчальний датасет, який складається із зібраних даних з кількох людей, які описують необхідні активності. У випадку HAR кожен рядок у датасеті є вектором ознак, витягнутим із сигналів у часовому вікні. Приклади у навчальному наборі можуть бути або не бути позначені, тобто пов'язані з відомим класом (наприклад, ходьба, біг тощо). Існує два підходи до навчання — із вчителем та без учителя, яке стосується відповідно мічених та нерозмічених даних.

Оскільки система розпізнавання людської діяльності повинна повертати клас діяльності, то більшість моделей для систем HAR використовують навчання із вчителем.

Найпопулярніші алгоритми, які використовуються для класифікації активностей, такі.

- *Дерева рішень*: будують ієрархічну модель, у якій атрибути відображаються на вузлах, а ребра — можливі значення атрибутів. Кожна гілка від кореня до вузла листя — це правило класифікації. Дерева рішень можуть бути оцінені в  $O(\log n)$  для  $n$  атрибутів і зазвичай генерують моделі, які легко зрозуміти людині.

- *Байєсівські методи*: обчислюють імовірності для кожного класу, використовуючи оцінені умовні ймовірності з навчального набору. Naïve Bayes (NB) [23] — основний представник цієї сім'ї класифікаторів. Ключовим питанням у байєсівських мережах є побудова топології, оскільки необхідно зробити припущення про незалежність серед особливостей. Наприклад, класифікатор NB передбачає, що всі функції умовно незалежні з урахуванням значення класу, але таке припущення у багатьох випадках не відповідає дійсності. Наприклад, сигнали прискорення, фізіологічні сигнали сильно корелюються між собою.

- *Метод опорних векторів (SVM)* [24]: широко використовується в HAR, хоча вони не містять набору зрозумілих людині правил. SVM покладаються на функції ядра, які проектують усі екземпляри на більший розмірний простір з метою пошуку лінійної межі розв'язку для розподілу даних.

- *Нейронні мережі та глибоке навчання*: останнім часом дуже популярним вибором як моделі стають глибокі нейронні мережі, які мають різну архітектуру [25]. Так само як і SVN, вони не працюють за зрозумілими правилами, імітуючи роботу нейронів у мозку людини. Недоліками такого підходу є необхідність великого датасету для початкового навчання. Оскільки нейронні мережі набули значного поширення, то можна розподілити їх на різні типи.

- *Convolutional Neural Network (CNN)*: клас нейронних мереж, що містять згорткові шари, які містять нейрони, що виконують згортку на невеликих частинах вхідної інформації, отримуючи таким чином ознаки, що несуть інформацію про локальні структури. Крім оброблення зображень [17], розпізнавання звуку та оброблення природних мов [19], CNN нещодавно почали застосовуватися для оброблення часових рядів у сенсорі HAR.

- *Long Short-Term Memory (LSTM)*: один з найуспішніших та найпоширеніших варіантів рекурентних нейронних мереж, у яких є шари, що містять комірки LSTM, здатні зберігати інформацію у внутрішній пам'яті. Ме-



режі LSTM використовуються для знаходження тимчасових залежностей у різноманітних галузях.

- *Рекурентні нейронні мережі (RNN)*: здатні моделювати довгострокові залежності у часових рядах, поширюючи інформацію через їх детермінований прихований стан. Наприклад TCN (Temporal Convolution Network) використовує великі послідовності даних, створюючи багато розширених згорток, що дає змогу моделювати більші послідовності подій. Використання RNN дозволило отримати відмінні результати у багатьох сферах, таких як послідовна класифікація зображень, аудіокласифікація, моделювання мови тощо [27].

- *Гібридна модель, що містить шари CNN і LSTM*: скориставшись високою модульністю архітектури на основі нейронних мереж, попередні дослідження довели, що гібридні архітектури можуть отримувати ознаки, які містять інформацію про короткострокові та довгострокові залежності в часовому ряду, і як результат дають кращі показники, ніж чисті CNN або LSTM мережі [26].

Класифікація людської діяльності — це останній і найважливіший крок у HAR. Більшість людських рухів/жестів — це динамічні процеси. Один динамічний процес завжди складається з декількох кадрів. Щоб класифікувати динамічні процеси, класифікацію людської діяльності потрібно виконувати після або разом з відстеженням людської діяльності. У підході до класифікації людської діяльності застосовують кілька методів: метод К-найближчих сусідів, приховану марковську модель, метод опорних векторів, метод ансамблю, динамічне деформування часових рядів, штучні нейронні мережі, глибоке навчання. Переваги та недоліки зазначених методів використовуваних для класифікації людської діяльності у процесі її розпізнавання наведено в табл. 3.

### **Оцінювання моделі**

Для оцінювання точності моделі передбачення використовується розбиття навчального набору даних на частини. Важливо, щоб показники, зняті з однієї людини, не входили одночасно в тренувальний набір та набір для тестування. Переважна більшість досліджень використовує перехресну валідацію зі статистичними тестами для порівняння ефективності класифікаторів. Результати класифікації для конкретного методу можуть бути організовані в матриці плутанини  $M$  ( $n \times n$ ) класифікації з  $n$  класами. Матриця  $M$  побудована таким чином, що елемент  $M_{ij}$  — це кількість екземплярів із класу  $i$ , які насправді були класифіковані як клас  $j$ . Таким чином, з такої матриці можна отримати важливі метрики:

- *True positive (TP)*: кількість позитивних екземплярів, які були класифіковані як позитивні.
- *True negative (TN)*: кількість негативних випадків, які були класифіковані як негативні.
- *False positive (FP)*: кількість негативних випадків, які були класифіковані як позитивні.
- *False negative (FN)*: кількість позитивних випадків, які були класифіковані як негативні.

Точність (accuracy) — стандартна метрика для визначення якості моделі. Загальна ефективність класифікації для всіх класів і визначається таким чином:

$$\text{accuracy} = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN).$$

Точність, яку часто називають позитивною прогнозою величиною (precision), — це відношення правильно класифікованих позитивних випадків до загальної кількості випадків, віднесених до позитивних:

$$\text{precision} = TP / (TP + FP).$$

Покриття (recall) — це відношення правильно класифікованих позитивних випадків до загальної кількості позитивних випадків:

$$\text{recall} = TP / (TP + FN).$$

F-міра поєднує в одному значенні precision і recall:  $F\text{-міра} = 2 \cdot (\text{precision} \cdot \text{recall}) / (\text{precision} + \text{recall})$ .

**Таблиця 3.** Порівняльний аналіз методів класифікації HAR

Метод класифікації людської діяльності	Переваги	Недоліки
Прихована марковська модель	Гнучкість навчання і перевірки, прозорість моделі	Потребує регулювання вхідних параметрів
Метод опорних векторів (SVM)	Є можливість застосовувати різні функції ядра	Кількість опорних векторів зростає лінійно з розміром навчального набору
Динамічне деформування часових рядів	Надійне нелінійне вирівнювання часових рядів	Складний підхід до структури даних, їх обсягу та часу на оброблення
Штучні нейронні мережі	Здатність виявляти складні нелінійні залежності між змінними	Не є можливим використання за наявності малої кількості даних, необхідна максимальна вибірка початкових даних для навчання
Глибоке навчання	Значно перевищує інші методи машинного навчання	Необхідна максимальна вибірка початкових даних для навчання, використовуються значні потужності на обчислення

Пріоритетною тенденцією сьогодення є підхід глибокого навчання. Основними обмеженнями глибокого навчання є обмежені обчислювальні потужності. Однак обчислювальна потужність має експоненціальне зростання. Кількість додатків HAR, заснованих на глибокому навчанні, швидко зростає. Перспективним напрямом є об'єднання різних алгоритмів класифікації для досягнення більшої ефективності HAR та вищої продуктивності. Координація алгоритмів класифікації людської діяльності за допомогою алгоритмів ідентифікації та відстеження рухів зумовить удосконалення механізму HAR.

Натепер, використовуючи state-of-the-art моделі, можна класифікувати певні типи рухів, які потребують значної рухливості, з точністю, близькою

до 100% (наприклад ходьба, біг, падіння). Для діяльностей, які використовують менше рухів, або потребують точнішого розпізнавання, точність все ще досить низька (наприклад, дихання чи швидкі стрибки) [26].

## ВИСНОВКИ

Усі натільні датчики мають переваги і недоліки, які ґрунтуються на функціональних можливостях та особливостях використання. Так, датчик-браслет має велику зону зондування. Щоб використовувати повний потенціал продуктивності HAR системи, в одній і тій же системі можуть комбінуватися різні датчики для HAR. Аналогічно датчикам різні алгоритми класифікації людської діяльності також мають свої переваги і недоліки, їх комбінування сприятиме підвищенню ефективності системи в цілому. Аналіз існуючих систем розпізнавання дій людини показав, що певні недоліки і незручності використання портативних натільних датчиків низького рівня можна компенсувати за рахунок методів машинного навчання і тим забезпечити багату контекстуальну інформацію в реальному застосуванні. Тому на відміну від існуючих прототипів в роботі наголос зроблено на дослідження властивостей таких систем з використанням новітніх згорткових нейронних мереж (CNN).

## ЛІТЕРАТУРА

1. WHO. *Demographic trends, statistics and data on ageing*. Available: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/Life-stages/healthy-ageing/data-and-statistics/demographic-trends,-statistics-and-data-on-ageing>.
2. S. Tal, S.J. Redmond, M.R. Narayan, and N.H. Lovell, *Sensors-Based Wearable Systems for Monitoring of Human Movement and Falls*. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5754557>.
3. A. Godfrey, R. Conway, D. Meagher, and G. ÓLaighin, “Direct measurement of human movement by accelerometry”, *Med. Eng. Phys.*, vol. 30, pp. 1364–1386, 2008.
4. J. Iglesias, J. Cano, A. M. Bernardos, and J.R. Casar, “A ubiquitous activity-monitor to prevent sedentariness”, in *IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2011.
5. Nielsen E. Sanchez, L. Antyn Canalos, and M. Tejera, “Hand Getsure recognition for Human Machine Intercation”, in *Proc. 12th International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision : WSCG, 2014*, pp. 137–148.
6. Y. Katsuki, Y. Yamakawa, and M. Ishikawa, “High-speed Human/Robot Hand Interaction System”, in *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction Extended Abstracts, ACM, 2015*, pp. 117–118.
7. Ke. Shian-Ru, Hoang Le Uyen Thuc, Yong-Jin Lee, Jenq-Neng Hwang, Jang-Hee Yoo, and Kyoung-Ho Choi, “A Review on Video-Based Human Activity Recognition”, in *Computers*, no. 2(2), pp. 88–131, 2013. Available: <https://www.mdpi.com/2073-431x/2/2/88>
8. О.О. Швачка та В.М. Барбарук, “Дослідження комп’ютерних технологій та методів розпізнавання жестів людини для керування комп’ютером”, *Наукові вісті Дніпровського університету*, 2018, № 15. Доступно: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu\\_2018\\_15\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu_2018_15_17)
9. В.В. Савінова та В.О. Колесніков, “Застосування методів комп’ютерного зору в автомобільній індустрії”, *Матеріали V Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції “Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транс-*

- порту”, 13–14 квітня 2017 р., м. Вінниця, с. 113–120. Доступно: <http://dSPACE.luguniv.edu.ua/xmlui/handle/123456789/2028>.
10. D. L. Oscar and A. L. Miguel, *A Survey on Human Activity Recognition using Wearable Sensors*. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6365160>.
  11. I. Khokhlov, L. Reznik, J. Cappos, and R. Bhaskar, *Design of Activity Recognition Systems with Wearable Sensors*. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8336752>.
  12. D. Choujaa and N. Dulay, “Tracme: Temporal activity recognition using mobile phone data”, in *IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing*, vol. 1, pp. 119–126, 2008.
  13. T. Brezmes, J.-L. Gorricho, and J. Cotrina, “Activity recognition from accelerometer data on a mobile phone”, in *Distributed Computing, Artificial Intelligence, Bioinformatics, Soft Computing, and Ambient Assisted Living*, Springer Berlin / Heidelberg, 2009, vol. 5518, pp. 796–799.
  14. T.-P. Kao, C.-W. Lin, and J.-S. Wang, “Development of a portable activity detector for daily activity recognition”, in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 115–120, 2009.
  15. F. Foerster, M. Smeja, and J. Fahrenberg, “Detection of posture and motion by accelerometry: a validation study in ambulatory monitoring”, *Computers in Human Behavior*, vol. 15, no. 5, pp. 571–583, 1999.
  16. M. Berchtold, M. Budde, H. Schmidtke, and M. Beigl, “An extensible modular recognition concept that makes activity recognition practical”, in *Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin / Heidelberg, 2010, pp. 400–409.
  17. S. Reddy, M. Mun, J. Burke, D. Estrin, M. Hansen, and M. Srivastava, “Using mobile phones to determine transportation modes”, *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 6, no. 2, pp. 1–27, 2010.
  18. Y.-P. Chen, J.-Y. Yang, S.-N. Liou, Gwo-Yun Lee, and J.-S. Wang, “Online classifier construction algorithm for human activity detection using a triaxle accelerometer,” *Applied Mathematics and Computation*, vol. 205, no. 2, pp. 849–860, 2008.
  19. J. Parkka, M. Ermes, P. Korpiainen, J. Mantyjarvi, J. Peltola, and I. Korhonen, “Activity classification using realistic data from wearable sensors”, in *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 10, no. 1, pp. 119–128, 2006.
  20. L. Bao and S.S. Intille, “Activity recognition from user-annotated acceleration data”, in *Pervasive Computing*, pp. 1–17, 2004.
  21. J. Cheng, O. Amft, and P. Lukowicz, “Active capacitive sensing: Exploring a new wearable sensing modality for activity recognition”, in *Pervasive Computing*, Springer Berlin / Heidelberg, 2010, vol. 6030 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 319–336,
  22. E.M. Tapia et al., “Real-time recognition of physical activities and their intensities using wireless accelerometers and a heart monitor”, in *International Symposium on Wearable Computers*, 2007.
  23. H. Zhang, “The Optimality of Naive Bayes”, in *FLAIRS Conference*, AAAI Press, 2004.
  24. C. Cortes and V. Vapnik, “Support-vector networks”, *Machine Learning*, vol. 20, pp. 273–297, 1995.
  25. Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville, *Deep Learning*, MIT Press, 2016. Available: <http://www.deeplearningbook.org>.
  26. Antonio Artés Rodríguez, *Human Activity Recognition using Inertial Sensors with Invariance to Sensor Orientation*. Available: [https://www.researchgate.net/publication/229597612\\_Human\\_Activity\\_Recognition\\_using\\_Inertial\\_Sensors\\_with\\_Invariance\\_to\\_Sensor\\_Orientation](https://www.researchgate.net/publication/229597612_Human_Activity_Recognition_using_Inertial_Sensors_with_Invariance_to_Sensor_Orientation).
  27. F. Luo, S. Poslad, and E. Bodanese, *Temporal convolutional networks for multi-person activity recognition using a 2D LIDAR*. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9051989>.

Надійшла 03.07.2020

### INFORMATION ON THE ARTICLE

**R.V. Kyslyi**, ORCID: 0000-0002-8290-9917, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: kvrware@gmail.com.

**A.I. Petrenko**, ORCID: 0000-0001-6712-7792, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: tolja.petrenko@gmail.com.

**HUMAN ACTIVITY RECOGNITION USING WEARABLE SENSORS / R.V. Kyslyi, A.I. Petrenko**

**Abstract.** The article describes systems of human activity recognition (HAR) that uses wearable sensors by the systematization of types of sensors for human activity recognition and methods of data collection. The model for implementation process of HAR is described and each component of the recognition process is thoroughly analyzed. Methods for identifying human activities using different sensors are proposed and their strengths and weaknesses are identified. The process of finding temporary matches between frames is presented in the diagram with a detailed explanation of each transition. Based on the analysis, a combination of both algorithms and methods is proposed, which will increase the HAR system's efficiency as a whole.

**Keywords:** human activity recognition, wear sensors, classification, tracking, display, identification, computer vision.

**РАСПОЗНАВАНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ПОРТАТИВНЫХ НАТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ / Р.В. Кислый, А.И. Петренко**

**Аннотация.** Исследованы системы распознавания человеческой деятельности (HAR) с помощью систематизации типов нательных датчиков для HAR и рассмотрены методы сбора данных с этих датчиков. Описана модель процесса реализации HAR и тщательно проанализирован каждый компонент процесса распознавания. Предложены методы идентификации человеческой деятельности для различных видов деятельности и определены их сильные и слабые стороны. Осуществлен сравнительный анализ этих методов. Процесс поиска временных совпадений представлен в виде диаграммы с подробным объяснением каждого перехода. На основе проведенного анализа предложено сочетание как алгоритмов, так и методов, которые будут способствовать повышению эффективности системы распознавания человеческой деятельности в целом.

**Ключевые слова:** распознавание человеческой деятельности, классификация, отслеживание, идентификация.

### REFERENCES

1. WHO. *Demographic trends, statistics and data on ageing*. Available: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/Life-stages/healthy-ageing/data-and-statistics/demographic-trends,-statistics-and-data-on-ageing>.
2. S.Tal, S.J. Redmond, M.R. Narayan, and N.H. Lovell, *Sensors-Based Wearable Systems for Monitoring of Human Movement and Falls*. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5754557>.
3. A. Godfrey, R. Conway, D. Meagher, and G. ÓLaighin, “Direct measurement of human movement by accelerometry”, *Med. Eng. Phys.*, vol. 30, pp. 1364–1386, 2008.
4. J. Iglesias, J. Cano, A. M. Bernardos, and J.R. Casar, “A ubiquitous activity-monitor to prevent sedentariness”, in *IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications*, 2011.
5. Nielsen E. Sanchez, L. Antyn Canalos, and M. Tejera, “Hand Getsure recognition for Human Machine Intercation”, in *Proc. 12th International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision : WSCG, 2014*, pp. 137–148.
6. Y. Katsuki, Y. Yamakawa, and M. Ishikawa, “High-speed Human/Robot Hand Interaction System”, in *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction Extended Abstracts, ACM, 2015*, pp. 117–118.

7. Ke. Shian-Ru, Hoang Le Uyen Thuc, Yong-Jin Lee, Jenq-Neng Hwang, Jang-Hee Yoo, and Kyoung-Ho Choi, "A Review on Video-Based Human Activity Recognition", in *Computers*, no. 2(2), pp. 88–131, 2013. Available: <https://www.mdpi.com/2073-431x/2/2/88>
8. O.O. Svachka and V.M. Barbaruk, "Research of computer technologies and methods of human gesture recognition for computer control", *Scientific news of Daliv University*, 2018, no. 15. Available: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu\\_2018\\_15\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu_2018_15_17)
9. V. Savinova and V. Kolesnikov, "Application of computer vision techniques in the automotive industry", in *Proceedings of the V International Scientific and Technical Internet Conference "Problems and Prospects for the Development of Road Transport"*, 13–14 of April 2017, Vinnytsia, pp. 113–120. Available: <http://dspace.luguniv.edu.ua/xmlui/handle/123456789/2028>.
10. D.L. Oscar and A. L. Miguel, *A Survey on Human Activity Recognition using Wearable Sensors*. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6365160>.
11. I. Khokhlov, L. Reznik, J. Cappos, and R. Bhaskar, *Design of Activity Recognition Systems with Wearable Sensors*. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8336752>.
12. D. Choujaa and N. Dulay, "Tracme: Temporal activity recognition using mobile phone data", in *IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing*, vol. 1, pp. 119–126, 2008.
13. T. Brezmes, J.-L. Gorricho, and J. Cotrina, "Activity recognition from accelerometer data on a mobile phone", in *Distributed Computing, Artificial Intelligence, Bioinformatics, Soft Computing, and Ambient Assisted Living*, Springer Berlin / Heidelberg, 2009, vol. 5518, pp. 796–799.
14. T.-P. Kao, C.-W. Lin, and J.-S. Wang, "Development of a portable activity detector for daily activity recognition", in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 115–120, 2009.
15. F. Foerster, M. Smeja, and J. Fahrenberg, "Detection of posture and motion by accelerometry: a validation study in ambulatory monitoring", *Computers in Human Behavior*, vol. 15, no. 5, pp. 571–583, 1999.
16. M. Berchtold, M. Budde, H. Schmidtke, and M. Beigl, "An extensible modular recognition concept that makes activity recognition practical", in *Advances in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin / Heidelberg, 2010, pp. 400–409.
17. S. Reddy, M. Mun, J. Burke, D. Estrin, M. Hansen, and M. Srivastava, "Using mobile phones to determine transportation modes", *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 6, no. 2, pp. 1–27, 2010.
18. Y.-P. Chen, J.-Y. Yang, S.-N. Liou, Gwo-Yun Lee, and J.-S. Wang, "Online classifier construction algorithm for human activity detection using a triaxial accelerometer," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 205, no. 2, pp. 849–860, 2008.
19. J. Parkka, M. Ermes, P. Korpijää, J. Mantyjarvi, J. Peltola, and I. Korhonen, "Activity classification using realistic data from wearable sensors", in *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 10, no. 1, pp. 119–128, 2006.
20. L. Bao and S.S. Intille, "Activity recognition from user-annotated acceleration data", in *Pervasive Computing*, pp. 1–17, 2004.
21. J. Cheng, O. Amft, and P. Lukowicz, "Active capacitive sensing: Exploring a new wearable sensing modality for activity recognition", in *Pervasive Computing*, Springer Berlin / Heidelberg, 2010, vol. 6030 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 319–336.
22. E.M. Tapia et al., "Real-time recognition of physical activities and their intensities using wireless accelerometers and a heart monitor", in *International Symposium on Wearable Computers*, 2007.
23. H. Zhang, "The Optimality of Naive Bayes", in *FLAIRS Conference*, AAAI Press, 2004.
24. C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks", *Machine Learning*, vol. 20, pp. 273–297, 1995.
25. Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville, *Deep Learning*, MIT Press, 2016. Available: <http://www.deeplearningbook.org>.
26. Antonio Artés Rodríguez, *Human Activity Recognition using Inertial Sensors with Invariance to Sensor Orientation*. Available: [https://www.researchgate.net/publication/229597612\\_Human\\_Activity\\_Recognition\\_using\\_Inertial\\_Sensors\\_with\\_Invariance\\_to\\_Sensor\\_Orientation](https://www.researchgate.net/publication/229597612_Human_Activity_Recognition_using_Inertial_Sensors_with_Invariance_to_Sensor_Orientation).
27. F. Luo, S. Poslad, and E. Bodanese, *Temporal convolutional networks for multi-person activity recognition using a 2D LIDAR*. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9051989>.

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ МАРКЕРІВ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

О.С. БЕЗПАЛЬКО

**Анотація.** Існують різні способи реалізації доповненої реальності. Найнадійнішим і найстабільнішим залишається маркерний спосіб. Зроблено спробу з'ясувати, яка з існуючих маркерних систем краща, точніша, надійніша, зручніша. Виконано порівняння існуючих маркерних систем, у яких використовуються візуальні маркери, що шифруються за допомогою площинних квадратів. Оцінку проведено на основі таких критеріїв, як зручність, ефективність, точність та надійність. Методики, які застосовувалися під час експериментів: визначення часу оброблення для виявлення та декодування маркера, точність визначення особливих точок, розпізнавання маркера у випадку проєктивних спотворень, розпізнавання декількох маркерів, розпізнавання з малою ділянкою маркера на зображенні, розпізнавання в умовах поганого фокуса зображення. Для порівняння використано чотири системи розпізнавання маркерів. Подано результати оцінювання як якісного, так і кількісного щодо зручності використання, ефективності, точності та надійності таких систем. Це забезпечує аналіз переваг та недоліків різних аспектів систем відстеження маркерів.

**Ключові слова:** доповнена реальність, маркери, швидкість розпізнавання.

### ВСТУП

**Мета дослідження** — порівняння декількох маркерних систем, у яких використовуються візуальні маркери, що кодуються площинними квадратами. У роботі наводяться основні результати роботи, підсумовуються і викладаються передумови для майбутніх досліджень.

Візуальні маркери широко застосовують у додатках доповненої реальності (augmented reality, AR) [1–3]. У більшості таких додатків продуктивність системи AR залежить від системи відстеження для виявлення візуального маркера та оцінювання розташування. Натепер доступно більше ніж одна система відстеження на основі маркерів. Таким чином, користувачу бажано знати, яка система відстеження маркерів, імовірно, найкраща для конкретної програми AR.

Основні завдання, які були поставлені, полягають у поданні якісних і кількісних результатів оцінювання для таких властивостей, як зручність, ефективність, точність та надійність. Для конкретної програми AR існують різні вимоги до виявлення та відстеження маркерів. Тому метою цієї роботи є не тестування конкретної існуючої маркерної системи (як це, наприклад, показано у праці [4]), а намагання проаналізувати силу та слабкість різних аспектів різних систем відстеження маркерів та надати розробникам додатків AR цю інформацію.

Технологія доповненої реальності (AR) поєднує в собі віртуальний та реальний світи разом, щоб забезпечити глядачам розширений погляд на

навколишнє середовище. Завдяки прогресу досліджень, пов'язаних з AR, в останнє десятиліття, разом з прогресом комп'ютерного обладнання та програмного забезпечення, системам AR приділяють дедалі більше уваги в таких галузях, як промисловість, медицина, військова та розважальна сфери (наприклад, [1, 5]). Типова система AR містить дисплей та відстежувач (трекер) руху з відповідним програмним забезпеченням. Програмне забезпечення зчитує події відстеження для знаходження положення дисплея і надсилає віртуальний об'єкт. Щоб візуалізувати правильно, потрібно правильно розмежувати віртуальні об'єкти та реальний світ. Це розмежування передбачає, що положення віртуальної камери, де відбувається доповнення реальності, відоме стосовно реального світу.

Візуальні маркери широко використовуються в існуючих системах AR, наприклад, ArToolKit [1], CyberCode [6], ArLoc [7] та ін. Усі вони використовують системи, засновані на візуальних маркерах, для відстеження руху та оцінювання позиції. Продуктивність таких систем AR істотно залежить від продуктивності виявлення, декодування та оцінювання маркерів. Натепер є декілька систем відстеження маркерів. Залежно від конкретної програми існують різні функції відстеження та оцінювання. Наприклад, 3D-графічні об'єкти часто потрібно накладати в хорошому співвідношенні з реальним світом. Це потребує від трекера забезпечення дуже точного оцінювання позиції. У випадку, коли відображається лише текстова інформація, вимоги до точності виявлення не такі високі. У простих програмах кількох маркерів достатньо. У великих промислових програмах можуть бути потрібними сотні або тисячі однозначно кодованих маркерів. Бажано дозволити розробнику програми AR визначати маркерну систему найбільш доцільну для неї.

Попри те, що існують дослідження щодо відходу від маркерної технології (наприклад, [8], [9]), точність у цих дослідження є сумнівною, і тому сьогодні маркерна система залишається найбільш надійною.

У програмах AR найчастіше використовуються маркери зору квадратної форми імовірно тому, що квадратна форма передбачає щонайменше чотири компланарні точки для можливості калібрування камери з одним маркером на сцені. Круговий маркер, навпаки, може надати лише одну точкову відповідність, тобто центр, якщо тільки не використовується саме коло. Якщо використовується центр, щонайменше три кругові маркери з відомими тривимірними положеннями мають бути виконані в одному зображенні для оцінювання позиції відносно камери [10]. У цій роботі оцінна робота зосереджена на системах відстеження маркерів плоских візуальних маркерів квадратної форми. Системи відстеження маркерів, які використовуються в цьому порівняльному дослідженні:

1. ArToolKit (ATK) [11];
2. Institut Graphische Datenverarbeitung (IGD) [12];
3. Siemens Corporate Research (SCR);
4. Hoffman Marker System (HOM), яка використовується SCR і Framatome ANP.

Ці маркерні системи вибрано тільки тому, що теорія фактично використовується в додатках AR і доступна для аналізу. Крім того, усі ці системи маркерів дозволяють користувачам створювати декілька кодів і надто схожі та порівнянні між собою у багатьох аспектах. Поки не вдалося протестувати



всі існуючі системи для цієї оцінки, тому використовується репрезентативний набір систем на основі маркерів.

Оцінювалися системи відстеження маркерів за такими властивостями, як зручність, ефективність, точність та надійність. Ці чотири основні властивості описують ефективність, переваги та недоліки цих систем відстеження маркерів. Зручність системи полягає в тому, чи легко користувачам інтегрувати систему в свої програми AR, враховується сумісність системи з іншими комп'ютерними платформами, що працюють у системах. Зручність можна порівняти лише якісно. Ефективність системи відстеження маркерів можна оцінити, обчисливши ефективність часу відстеження. Цю властивість можна оцінити за необхідним часом роботи для виявлення та декодування маркерів або частотою кадрів під час відстеження руху маркерів у відеороликах у режимі реального часу. Точність визначається щодо помилок у вилученні функцій із 2D-зображень. Не враховувалися похибки в оцінці позиції або проекції назад, оскільки вони залежать від внутрішніх параметрів камери та алгоритмів калібрування. Незважаючи на те, що технології мають відмінності, використовувався відхід, відповідно до якого оцінка проводилася за спільними ознаками функціонування і на основі яких обчислювалися середні похибки та стандартні відхилення відповідних функцій. Надійність описує можливість системи виявляти та відслідковувати маркер у неідеальних умовах. Наприклад, виявлення маркерів у відео, знятих погано сфокусованою камерою або з великим проективним викривленням. Також оцінюється здатність системи виявляти та правильно декодувати маркери в малих регіонах, які нас цікавлять.

У роботі наведено чотири маркерні системи виявлення та декодування, подано кількісні результати порівняльних досліджень з подальшим якісним оцінюванням зручності використання та масштабованості цих систем, а також підбито підсумки та надано деякі підказки щодо вибору системи відстеження маркерів на основі додатків. Маркери ATK поставляються з ArToolKit.

## МАРКЕРНІ СИСТЕМИ

Маркер ATK показано на рис. 1. Маркер кодується із зображенням усередині внутрішнього квадрата маркера.



Розшифрування маркера ґрунтується на дуже спрощеному алгоритмі відповідності шаблону, який порівнює три інваріанти геометрії маркерової ділянки з тими шаблонами, які попередньо зареєстровані

Рис. 1. Маркер для ArToolKit в системі.

Вихідні коди ArToolKit як для Unix, так і для систем Windows доступні в Інтернеті безкоштовно [11] разом з документами, зразковими програмами та іншими утилітами для калібрування камери, накладання віртуальних об'єктів тощо. Виявлено, що пакет ATK добре задокументований і дуже простий у використанні. Система маркерів ATK широко використовується для прототипування додатків AR [1].

Система маркування НОМ (рис. 2) була спочатку розроблена К. Хоманом у 1994 р. у компанії Siemens AG для фотограмметрії. Пізніше ця систе-

ма використовувалася у промисловій документації та технічному обслуговуванні. Окрім головної площі, є бічна смужка, яка забезпечує 6 біт кодування для підвищення надійності розпізнавання маркера. Ця маркерна система використовувалася для 3D реконструкції та AR документації на основі зображень високої роздільної здатності (наприклад,  $3000 \times 2000$  пікселів). Ці маркери використовували Siemens і Framatome ANP для калібрування камери та реконструкції в багатьох електростанціях, хімічних заводів та нафтових платформ.

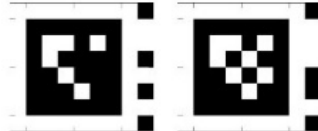


Рис. 2. Зразки маркерів, розроблені компанією Siemens AG (НОМ)

В оригінальній версії системи НОМ є лише виконуваний файл для оброблення статичних зображень. Siemens Corporate Research (SCR) розробили бібліотеку програмного забезпечення, яка може бути використана для оброблення послідовностей відео в режимі реального часу.

Систему маркерів IGD реалізовано в IGD, який є партнером ARVIKA [12].

ARVIKA — це дослідницький проект, який підтримує уряд Німеччини з розроблення програм, пов'язаних з AR. Багато програм, пов'язаних з ARVIKA, розроблено за допомогою системи маркерів IGD. На рис. 3 показано два маркери IGD. Маркер IGD — це квадрат, розділений на  $6 \times 6$  квадратних плиток однакового розміру. Внутрішня плитка розміром  $4 \times 4$  використовується для визначення орієнтації та коду маркера. Попередньо складені бібліотеки системи маркерів IGD доступні для учасників ARVIKA.



Рис. 3. Маркери, розроблені в IGD

Систему маркерів SCR розроблено в корпорації Siemens Corporate Research (SCR) для локалізації та відстеження [5] у різних додатках AR (рис. 4) [4].

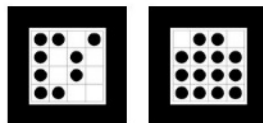


Рис. 4. Зразки маркерів, розроблені компанією SCR

Ця система використовується деякими партнерами ARVIKA. Маркери SCR кодуються із внутрішньою матрицею. Кожен маркер SCR пропонує вісім відповідних точок функції.

## ДОСЛІДЖЕННЯ

### Умови проведення експериментів

Параметри комп'ютера:

- процесор — Intel(R) Core(TM) i7-9700K CPU @ 3.60GHz;

- оперативна пам'ять — 32 ГБ;
- тип системи — Windows 10 Pro.

Параметри камери:

- розширення матриці — 12 Мп + 12 Мп;
- діафрагма —  $f/1.8 + f/2.4$ ;
- запис відео — Full HD (1920×1080);
- оптична стабілізація — наявна;
- кількість осей стабілізації — 4;
- фокусування — фазова (PDAF);
- друга камера — 5 Мп,  $f/2.0$ .

**Відео.** Оцінювання проводилось шляхом оброблення відеопослідовностей на сотню кадрів. Усі послідовності відео в одному наборі для порівняння записуються в абсолютно однакових умовах. Процедура знімання набору відеопослідовностей для порівняння:

1. Зачинається вікно, умикається світло в кімнаті, камера фіксується на штативі.
2. Маркери закріплюються на тлі, призначеному для оцінювання.
3. Зберігається відеопослідовність певної довжини з певною швидкістю, наприклад, 45 с за 10 кадрів/с.
4. Під час відеознімання здійснюється повільний рух камери для розрізнення зображень від кадру до кадру.
5. Маркери замінюються на одному й тому ж тлі, відео знімається однакової довжини з однаковою швидкістю для всіх наборів маркерів.
6. Використовується відеоредактор: вирізаються перші 30–80 кадрів кожної послідовності відео для збереження решти відеокадрів стабільної інтенсивності від першого до останнього. Усі маркери друкуються на папері однакового розміру.

### Визначення часу оброблення для виявлення та декодування маркера

Середній час для відстеження маркера, який включає необхідне оброблення зображення, виявлення та декодування маркерів, визначення особливих функцій усіх розпізнаних маркерів, наведено в табл. 1, у якій розмір відеозображення у пікселях; ROM (region of marker) /MPF (number of markers perframe) — ділянка маркерів (найменша прямокутна ділянка, яка містить усі маркери на зображенні) та кількість маркерів на кадр.

**Таблиця 1.** Середній час оброблення для розпізнавання маркера (мс/кадр)

Розширення	ROM/MPF	ATK	ROM	IGD	SCR	ScrT
2160 × 1080	68 × 68/1	4,0	5,0	6,0	11,4	3,6
	60 × 70/1	4,1	4,8	6,5	12,0	3,0
	190 × 150/3	7,0	10,1	—	15,0	—
	256 × 206/10	24,0	35,3	—	20,0	—

Для кожної системи, крім ROM, визначався маркер 20 разів для кожного кадру. Час оброблення осереднюється під час оброблення відеопослідовностей на сотню кадрів. Навіть за допомогою DidierStriker в IGD не вдалося виявити кілька маркерів на одному зображенні за допомогою системи IGD. Тому відповідні комірки табл. 1 не заповнені для маркерів IGD.

Як бачимо з табл. 1, вищі показники часу роботи для виявлення та декодування одного маркера отримує АТК. Час оброблення як систем АТК, так і НОМ-маркерів дуже залежить від кількості маркерів на зображенні. Система SCR працює найгірше. Однак вона менше залежить від кількості маркерів.

Показник ScrT — час оброблення з увімкненою функцією відстеження маркерної системи SCR. Якщо функцію відстеження ввімкнено, система маркерів відстежує один маркер на основі особливостей маркера, витягнутих з попереднього зображення. Продуктивність цієї системи в цьому випадку різко зростає. Поточні версії інших систем не мають подібних механізмів.

### Точність визначення особливих точок

Оскільки маркерні системи різні і алгоритми визначення також різні, можна порівняти лише за спільними особливостями цих алгоритмів, а саме, кути, вилучені за допомогою чітко встановленого алгоритму виявлення кутів. Під час оцінювання кути виявляються за допомогою бібліотеки OpenCV (OCV) [13] для обчислення відповідності. Перший критерій, який використовується для оцінювання, отримується таким чином:

- використовуються крайові точки, виявлені навколо кожного кута маркера, для розміщення двох прямих у цій невеликій ділянці;
- обчислюється перетин двох прямих як точки для порівняння.

Причиною для введення другого критерію для порівняння є те, що процес виявлення ребер найменшої квадратної лінії та перетину (LIT, line of intersection) може діяти як фільтр для усунення деяких шумів зображення та отримання кращих точок функції.

Усі відео, що використовуються в цьому оцінюванні, мають розширення  $2160 \times 1080$  з високим фокусом та одним маркером розміром  $70 \times 70$  пікселів, що міститься в центрі зображень. При цьому вплив радіального викривлення зводиться до мінімуму. Таким чином, справжні точки характеристики повинні бути дуже близькими до точок LIT або OCV. Середня відстань та стандартне відхилення наведено в табл. 2. Кут — кут огляду камери.

**Таблиця 2.** Похибки, пов'язані з точками LIT (середня відстань) / (стандартне відхилення) (у пікселях)

Кут, °	АТК	НОМ	IGD	SCR
90	1,42/0,56	0,97/0,47	0,85/0,30	0,47/0,26
75	1,42/0,50	0,85/0,44	0,85/0,31	0,59/0,35
60	1,28/0,44	0,88/0,35	0,83/0,32	0,60/0,33
45	1,60/0,44	0,93/0,47	0,98/0,43	0,63/0,40
30	1,26/0,39	0,91/0,36	0,95/0,39	0,62/0,31
Середнє значення	1,40/0,46	0,91/0,42	0,89/0,35	0,58/0,33

Результати визначення похибок, пов'язаних з точками OCV, середня відстань і стандартне відхилення наведено в табл. 3.

**Таблиця 3.** Похибки, пов'язані з точками OCV (середня відстань) / (стандартне відхилення) (у пікселях)

Кут, °	АТК	НОМ	IGD	SCR
90	1,54/0,31	1,23/0,15	0,16/0,09	0,59/0,41
75	1,44/0,07	1,11/0,04	0,21/0,10	0,58/0,08
60	1,41/0,11	1,16/0,04	0,37/0,13	0,77/0,23
45	1,51/0,22	1,06/0,14	0,40/0,12	0,54/0,13
30	1,24/0,19	1,16/0,06	0,45/0,25	0,72/0,18
Середнє значення	1,43/0,18	1,14/0,09	0,32/0,14	0,64/0,15

З обох порівнянь з результатами LIT та OCV спостерігаємо, що похибка вилучення функцій вища для системи АТК. Причина полягає в тому, що система АТК безпосередньо витягує функції з двійкових зображень. Цей метод економить обчислювально-електронні ресурси, але залишає більшу похибку з вилученням функції. Решта систем маркерів з цим дослідженням упорались досить добре, якщо порівнювати результати LIT та OCV.

### Розпізнавання маркера

Розпізнаваність маркера оцінює здатність системи маркерів надійно виявляти і декодувати маркер у різних недружніх умовах. У цій роботі перевіряються розпізнавання невеликої ділянки з маркером (ROM), швидкість розпізнавання маркера у випадку проєктивних спотворень та швидкість розпізнавання маркерів із відео, записаного не добре сфокусованими камерами.

**Розпізнавання у випадку проєктивних спотворень.** Рівень проєктивних спотворень подано кутами огляду 90° – 15°. Результати порівняння наведено в табл. 4. Ті ж відео були використані для оцінювання точності вилучення ознак маркерних систем.

**Таблиця 4.** Розпізнавання маркера у випадку проєктивних спотворень (%)

Кут, °	АТК	НОМ	IGD	SCR
90	100	100	100	100
75	100	100	100	100
60	100	100	100	100
45	100	100	100	97
30	100	100	100	94
15	70/( cf ≥ 0,50) 17/( cf ≥ 0,67) 9/( cf ≥ 0,75)	100	0	8

Система АТК пов'язує кожен вилучений маркер зі значенням степеня довіри cf (confidence) до розпізнавання для декодування маркера. Якщо  $cf \geq 0,50$ , система АТК вважає маркер розпізнаваним. У системі НОМ порядок розпізнавання маркерів оцінюється за допомогою 7 рівнів, позначених від 0 до 6, причому 0 є найвищим, а 6 – найнижчим. Коли значення степеня довіри близьке до 1, маркер розпізнається з дуже високою вірогідністю. Тільки коли маркер виявляється та декодується з високою вірогідністю, сис-

тема SCR вважає маркер розпізнаваним, інакше нічого не повідомлятиметься. Ця функція знижує помилкове розпізнавання, але може призвести до відносно нижчого показника розпізнавання.

**Розпізнавання відео з декількома маркерами.** Показник розпізнавання маркерів для відео, на якому знято кілька маркерів, наведено в табл. 5.

**Таблиця 5.** Розпізнавання маркера за їх великої кількості (%)

Розширення	ROM/MPF	АТК/cf	НОМ	SCR
2160 × 1080	(516 × 416) / 10	89/(cf ≥ 0,50) 60/( cf ≥ 0,67) 47/( cf ≥ 0,75)	100	82
	(260 × 220) / 10	82/( cf ≥ 0,50) 39/( cf ≥ 0,67) 30/( cf ≥ 0,75)	100	71

Зареєстровано 21 маркер до системи АТК для перевірки здатності системи розрізняти маркери, які мають схожі зразки. Виявлено деякі проблеми з розпізнаванням маркерів. Наприклад, маркер із зображенням числа «3» розпізнається як маркер із зображенням «2» з високим значенням степеня довіри (cf = 0,85) системою АТК.

**Розпізнавання з малою ділянкою маркера на зображенні.** Оцінимо продуктивність цих систем, коли розмір зображення (піксела) маркера невеликий. Під час записування відео змінюємо лише масштабування камери так, щоб маркер спочатку був великим, а потім плавно зменшуємо його до дуже малого розміру. Зберігаємо всі інші фактори, такі як глибина від камери до маркера та фізичний розмір маркерів, які впливають на розмір зображення маркера (у пікселях), який не змінюється. Високошвидкісна функція автофокусування тримає камеру добре сфокусованою від початку до кінця.

Результати показують, що система АТК показала найкращі результати в цьому експерименті. Він може виявити і декодувати маркер розміром 14×14 пікселів з 320×240 пікселів. Цей показник для НОМ становить 19×21, для SCR 21×21 і для IGD 44×44.

**Розпізнавання з поганим фокусом.** Спочатку вручну налаштовується фокус камери до найкращого рівня, а потім записується відео для кожної системи маркерів. Далі погіршуємо фокусування камери приблизно на 20% кожен крок, щоб вивести його із фокуса. Результати розпізнавання маркерів наведено в табл. 6. Інтригує, що значення рівня довіри (cf), надане системою АТК для найгіршого сфокусованого відео, вище, ніж у деяких із краще сфокусованим відео. Це свідчить про те, що значення рівня довіри, отримане системою АТК, може бути не надто надійним.

**Таблиця 6.** Розпізнавання з погіршеним фокусом (%)

Фокус	АТК	НОМ	IGD	SCR
Ідеальний	100 (cf = 0,78)	100	100	100
Гарний	100 (cf = 0,82)	100	100	100
Поганий	100 (cf = 0,63)	100	28	97
Гірший	100 (cf = 0,55)	0	12	0
Найгірший	100 (cf = 0,73)	0	0	0

## **ДИСКУСІЯ ТА ПІДСУМКИ**

Система маркерів АТК сумісна з більшістю комп'ютерних систем. Маркер АТК добре документований і простий у використанні. Виявлення та декодування маркерів АТК швидке і стабільне. Він мав найкращі результати в декількох аспектах, таких як швидкість оброблення одного маркера та розпізнавання невеликою ділянкою, у тестах, наведених у цій роботі. Придатний для складання прототипів і широко застосовується в різних програмах AR. Проте для додатків, які потребують сотень чи тисяч різних маркерів, таких як обслуговування та локалізація у великих промислових умовах або інших будівлях, досить затратно реєструвати кожен маркер, а потім змінювати реєстрацію маркера вручну, як цього вимагає система. Система АТК використовує дуже спрощений алгоритм відстеження шаблонів для декодування маркера. Алгоритм порівнює кілька інваріантів маркера, виявленого на зображенні, із шаблонами, зареєстрованими в системі. Перевага такого підходу — висока швидкість оброблення. Утім таке спрощення також зумовлює проблеми з розпізнавання помилкових маркерів. Для усунення проблеми помилкового розпізнавання потрібен жорсткий алгоритм відповідності шаблонів, який може бути затратним для обчислень, особливо за великої кількості попередньо зареєстрованих маркерів. Система АТК безпосередньо використовує двійкове зображення, яке створює маркерне виявлення для вилучення точок зображення. Оскільки положення ребер маркера залежать від порога бінарного зображення, це може спричинити системні похибки в точності вилучених точок функції.

Система маркування НОМ працює в багатьох аспектах. Маркер розроблено із систематичним кодуванням, як і маркери IGD і SCR. Крім того, на кожному маркері є додаткова візуальна структура, що підвищує надійність декодування. Привабливою особливістю, що надається системою маркування НОМ, є те, що вона забезпечує 7 рівнів довіри (від 0 до 6), що вказують на достовірність результатів виявлення та декодування маркера для кожного виявленого маркера. Коли рівень довіри становить менше ніж 2, маркер розпізнається з високою надійністю. Якщо рівень конфіденційності становить більше за 5, результати декодування маркера зазвичай не є надто надійними. Із проведеного тестування та реального застосування в галузях бачимо, що рівень довіри НОМ надійний і відповідає якості зображення маркерів. Це дуже відрізняється від того, що спостерігалось для рівня довіри системи АТК, який не є настільки надійним та послідовним у деяких випадках.

Система маркерів SCR надто повільна для виявлення та вилучення особливостей на одному кадрі. Однак вона використовує інформацію про тимчасове відстеження для швидшого виконання на відміну від інших систем, і продуктивність знижується мінімально, у випадку коли кількість маркерів на кадр збільшується. Добре працює в інших аспектах, таких як точність вилучення точок функції та надійність виявлення і декодування. Систематичне кодування не потребує жодної попередньої реєстрації на використання маркерів SCR. Це стосується і маркерів НОМ та IGD. Із матрицею кодування  $4 \times 4$  може бути більше 10 000 унікальних кодів. Кожен маркер SCR пропонує 8 характеристичних точок для оцінювання пози, що забезпечує кращу оцінку позицій.

Систему маркерів IGD широко використовують у багатьох проектах ARVIKA. Як і маркери HOM і SCR, маркери IGD також систематично кодуються. Вилучення функції маркера є точним, а швидкість оброблення — прийнятною. Незважаючи на те, що не вдалося виявити кілька маркерів з одного і того ж зображення за допомогою цієї системи, проте подібний функціонал міг бути реалізований, але не знайдений через недостатній досвід роботи із системою IGD.

## ВИСНОВКИ

Візуальні маркери широко використовуються в існуючих додатках доповненої реальності (AR). У цій роботі порівнювались системи ATK ARtoolkit, IGD, HOM та SCR. Подано результати оцінки як якісно, так і кількісно щодо зручності використання, ефективності, точності та надійності цих систем. Це забезпечує аналіз переваг та недоліків різних аспектів систем відстеження маркерів. Для конкретної програми AR є різні вимоги до виявлення та відстеження маркерів. Результати оцінювання, продемонстровані в цій роботі, можуть спрямовувати читачів на вибір правильної системи відстеження маркерів для їх конкретного застосування. Оцінка маркерних систем зі спотвореннями камер за різних умов освітлення та зі складними множинними конфігураціями маркерів у 3D-просторі ще не проводились, що може бути підґрунтям для майбутніх досліджень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Y. Ham and M. Golparvar-Fard, “EPAR: Energy Performance Augmented Reality models for identification of building energy performance deviations between actual measurements and simulation results”, *Energy and Buildings*, vol. 63, pp. 15–28, 2013.
2. J. Scholz and K. Duffy, “We ARe at home: How augmented reality reshapes mobile marketing and consumer-brand relationships”, *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 44, pp. 11–23, 2018.
3. S.M. C. Loureiro, J. Guerreiro and F. Ali, “20 years of research on virtual reality and augmented reality in tourism context: A text-mining approach”, *Tourism Management*, vol. 77, pp. 104028, 2020.
4. P.V. Esch, D. Arli, M. H. Gheshlaghi, V. Andonopoulos, T. V. D. Heidt, and G. Northey, “Anthropomorphism and augmented reality in the retail environment”, *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 49, pp. 35–42, 2019.
5. C. Goebert and G. P. Greenhalgh, “A new reality: Fan perceptions of augmented reality readiness in sport marketing”, *Computers in Human Behavior*, vol. 106, pp. 106231, 2020.
6. T. Liao, “Future directions for mobile augmented reality research: Understanding relationships between augmented reality user’s nonusers content devices and industry”, *Mobile Media & Communication*, vol. 7, no. 1, pp. 131–149, 2018.
7. M. S. Sidhu, “Evaluation Study Outcome of Augmented Reality Technology for Solving Engineering Problems in UNITEN”, *International Journal of Information and Communication Technology Education*, vol. 15, no. 2, pp. 69–84, 2019.
8. Y. Zhang, D. Guo, D. Yao, and P. Xu, “The extension of multivariate synchronization index method for ssvp-based bci”, *Neurocomputing*, vol. 269, pp. 226–231, 2017.



9. S. Kishore et al., “Comparison of ssepbc and eye tracking for controlling a humanoid robot in a social environment”, *Presence-Teleoper. Virtual Env.*, vol. 23, no. 3, pp. 242–252, 2014.
10. P. Achlioptas, O. Diamanti, I. Mitliagkas, and L. J. Guibas, “Learning representations and generative models for 3d point clouds”, in *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning ICML 2018*, pp. 40–49, 2018.
11. ArToolKit [Online]. Available: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/> (accessed on: 10.05.2020).
12. ARVIKA [Online]. Available: <http://www.arvika.de/www/index.htm> (accessed on: 05.05.2020).
13. *Open source computer vision library* [Online]. Available: <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/> (accessed on: 07.05.2020).

*Надійшла 21.06.2020*

### INFORMATION ON THE ARTICLE

**O.S. Bezpalko**, ORCID: 0000-0001-7595-6179, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: bos0x0mail@gmail.com.

**RESEARCH OF AUGMENTED REALITY MARKER RECOGNITION SYSTEMS / O.S. Bezpalko**

**Abstract.** There are different ways to implement augmented reality. The marker method remains the most reliable and stable. An attempt has been made to determine which of the existing marker systems is better, more accurate, more reliable, and more convenient. A comparison of existing marker systems using visual markers encrypted using planar squares was made. The assessment was made based on criteria such as convenience, efficiency, accuracy, and reliability. Techniques used during the experiments: determination of processing time for detection and decoding of the marker, accuracy of determination of special points, recognition of the marker in case of projective distortions, recognition of several markers, recognition with a small area of the marker in the image, recognition in poor image focus. Four marker recognition systems were used for comparison. The evaluation results of both qualitative and quantitative in terms of ease of use, efficiency, accuracy, and reliability of such systems are presented. This provides an analysis of the advantages and disadvantages of various aspects of marker tracking systems.

**Keywords:** augmented reality, markers, recognition speed.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ МАРКЕРОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ / А.С. Беспалько**

**Аннотация.** Существуют различные способы реализации дополненной реальности. Наиболее надежным и стабильным остается маркерный способ. В работе выяснено какая с маркерных систем лучшая, точнее, надежнее, удобнее. Выполнено сравнение существующих маркерных систем, в которых используются визуальные маркеры, шифруются с помощью плоскостных квадратов. Оценку проведено на основе таких критериев, как удобство, эффективность, точность и надежность. Методики, которые применялись во время экспериментов: определение времени обработки для выявления и декодирования маркера, точность определения особых точек, распознавание маркера при проективных искажениях, распознавание нескольких маркеров, распознавания с малой областью маркера на изображении, распознавания в условиях плохого фокуса изображения. Для сравнения использованы четыре системы распознавания маркеров. Были представлены результаты оценки как качественно, так и количественно с точки зрения удобства использования, эффективности, точности и надежности этих систем. Это обеспечивает анализ преимуществ и недостатков различных аспектов систем отслеживания маркеров.

**Ключевые слова:** дополненная реальность, маркеры, скорость распознавания.

## REFERENCES

1. Y. Ham and M. Golparvar-Fard, "EPAR: Energy Performance Augmented Reality models for identification of building energy performance deviations between actual measurements and simulation results", *Energy and Buildings*, vol. 63, pp. 15–28, 2013.
2. J. Scholz and K. Duffy, "We ARe at home: How augmented reality reshapes mobile marketing and consumer-brand relationships", *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 44, pp. 11–23, 2018.
3. S.M.C. Loureiro, J. Guerreiro and F. Ali, "20 years of research on virtual reality and augmented reality in tourism context: A text-mining approach", *Tourism Management*, vol. 77, pp. 104028, 2020.
4. P.V. Esch, D. Arli, M.H. Gheshlaghi, V. Andonopoulos, T.V.D. Heidt, and G. Northey, "Anthropomorphism and augmented reality in the retail environment", *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 49, pp. 35–42, 2019.
5. C. Goebert and G.P. Greenhalgh, "A new reality: Fan perceptions of augmented reality readiness in sport marketing", *Computers in Human Behavior*, vol. 106, pp. 106231, 2020.
6. T. Liao, "Future directions for mobile augmented reality research: Understanding relationships between augmented reality user's nonusers content devices and industry", *Mobile Media & Communication*, vol. 7, no. 1, pp. 131–149, 2018.
7. M.S. Sidhu, "Evaluation Study Outcome of Augmented Reality Technology for Solving Engineering Problems in UNITEN", *International Journal of Information and Communication Technology Education*, vol. 15, no. 2, pp. 69–84, 2019.
8. Y. Zhang, D. Guo, D. Yao, and P. Xu, "The extension of multivariate synchronization index method for ssvp-based bci", *Neurocomputing*, vol. 269, pp. 226–231, 2017.
9. S. Kishore et al., "Comparison of ssvp-bci and eye tracking for controlling a humanoid robot in a social environment", *Presence-Teleoper. Virtual Env.*, vol. 23, no. 3, pp. 242–252, 2014.
10. P. Achlioptas, O. Diamanti, I. Mitliagkas, and L. J. Guibas, "Learning representations and generative models for 3d point clouds", in *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning ICML 2018*, pp. 40–49, 2018.
11. *ArToolKit* [Online]. Available: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/> (accessed on: 10.05.2020).
12. *ARVIKA* [Online]. Available: <http://www.arvika.de/www/index.htm> (accessed on: 05.05.2020).
13. *Open source computer vision library* [Online]. Available: <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/> (accessed on: 07.05.2020).

## **ЗАСТОСУВАННЯ РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ І ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ФІНАНСОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ПІДПРИЄМСТВА**

**Н.В. КУЗНЕЦОВА, З.С. ЧЕРНИШ**

**Анотація.** Досліджено задачу прогнозування успішності діяльності компанії на основі її фінансових показників на базі регресійних моделей. Побудовано множину моделей на основі лінійної множинної регресії, авторегресії з ковзним середнім, авторегресії з інтегрованим ковзним середнім та сезонної моделі авторегресії з інтегрованим ковзним середнім для прогнозування абсолютної величини фінансових показників. Проведено експериментальне дослідження на реальних даних і виконано прогнозування на основі регресійних моделей, методу групового урахування аргументів та авторегресійної нейронної мережі. Для прогнозування волатильності фінансового ряду застосовано гетероскедастичні моделі зі змінною волатильністю типу ARCH та GARCH. Застосовано попереднє оброблення даних з використанням методу Хольта-Вінтерса та фільтра Калмана, що дозволило істотно покращити якість моделей і точності прогнозування. Запропоновано і розроблено комбінацію моделей сезонної авторегресії з інтегрованим ковзним середнім та гетероскедастичної, що дало змогу врахувати наявні сезонні ефектів і тренди, притаманні фінансовим рядам, і отримати високі прогнозні оцінки для фінансових показників.

**Ключові слова:** регресійні моделі, сезонна модель авторегресії з інтегрованим ковзним середнім, лінійна множинна регресія, попереднє оброблення даних, гетероскедастичні моделі.

### **ВСТУП**

Діяльність будь-якого підприємства в умовах конкурентного середовища та впливів ззовні має постійно переглядатися та коригуватися через появу нових факторів, продуктів конкурентів, зміни фінансового обрахунку всередині компанії, зміни нормативної бази тощо. Об'єктивною можливістю постійного віддзеркалення успішності діяльності компанії в ринкових умовах є перевірка та глибинний аналіз фінансової звітності [1–3]. Виконання такого аналізу для працюючого підприємства потребує, по-перше, оброблення великого масиву різноманітних даних, не завжди ідеальних за якістю, і, по-друге, наявності адекватних математичних моделей, які враховують особливості фінансових процесів і впливів на них [4, 5]. Застосування відомого математичного апарату регресійних моделей [1, 4, 5, 6], доповненого засобами попереднього оброблення вхідних даних [3], може надати аналіти-

кам підприємства зручний інструмент для швидкого поточного оцінювання стану і прогнозування фінансових показників. Це дозволить не лише спрогнозувати розвиток діяльності компанії на основі основних економічних факторів, а й оцінити фінансову спроможність компанії до розвитку і модернізації, закупівлі нових засобів та сировини, коригування послідовності та ефективності діяльності її менеджменту.

## **ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ**

Визначити основні методи і моделі для аналізу та прогнозування фінансових показників. Запропонувати алгоритм побудови прогнозу фінансових показників стійкості компанії із застосуванням регресійних моделей для його подальшої імплементації у систему підтримання прийняття рішень. Виконати моделювання та прогнозування основних показників із застосуванням регресійних моделей, методу групового урахування аргументів (МГУА), нейронних мереж тощо. Оцінити волатильність залишків фінансового процесу на основі гетероскедастичних моделей. Забезпечити можливість попереднього оброблення даних, виконання фільтрації та згладжування даних у разі наявності аномальних, пропущених даних або викидів, застосувати її до реальних даних та порівняти результати прогнозування на побудованих моделях до і після додаткового оброблення вхідних даних.

## **МЕТОДИ АНАЛІЗУ ФАКТОРІВ ФІНАНСОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ**

Одним з найважливіших факторів успішності підприємства є його фінансовий стан, тобто певна сукупність показників, що характеризують його конкурентоспроможність (платоспроможність або кредитоспроможність), використання капіталу та фінансових ресурсів, здатність виконувати зобов'язання перед державою або іншими підприємствами. Існують цілі підрозділи, аудиторські відділи, які здійснюють фінансовий аналіз підприємства як ззовні, так і всередині. Основним етапом фінансового аналізу є саме прогнозування фінансово-економічного стану компанії. Фінансове прогнозування — це процес оцінювання і формування прогнозів, метою яких є ефективна організація діяльності підприємства, передбачення наслідків прийняття певних рішень. Завданнями фінансового прогнозування є оцінка очікуваного обсягу фінансових ресурсів, пошук джерел формування та напрямів ефективного використання фінансових ресурсів, напрацювання рекомендацій для раціональної фінансової стратегії і тактики менеджменту компанії. Для отримання адекватних прогнозів потрібно виконати велику кількість експериментальних досліджень із застосуванням різноманітних методів прогнозування, щоб визначити найбільш імовірне значення або довірчий інтервал для фінансового показника.

Серед методів прогнозування зазвичай виділяють дві категорії: якісні та кількісні. Якісні методи — методи експертних оцінок, метод Делфі, прогнозування на основі очікування — базуються на суб'єктивних оцінках та інтуїтивно-логічному мисленні і використовуються тоді, коли на прогнозований процес впливає велика кількість факторів, усі з яких неможливо врахувати, або за наявності високого ступеня невизначеності та повної відсутності інформації про об'єкт прогнозування. Кількісні методи прогнозування

ґрунтуються на математичних методах і підходах, передбачають розроблення математичних моделей, можуть застосовувати каузальні методи (однобічне згладжування, ковзне середнє, подвійне експоненціальне згладжування), методи часових рядів (із застосуванням адитивного або мультиплікативного методу декомпозиції), методи штучного інтелекту (нейронні мережі, мережі Байєса, групові методи оброблення даних, методи опорних векторів тощо).

### Регресійні моделі

Моделі авторегресії широко застосовують для опису стаціонарних процесів в економічних дослідженнях. Побудова авторегресійних моделей в економіці заснована на такій важливій властивості рядів економічних явищ і процесів, як взаємозалежність рівнів одного і того ж ряду один від одного. Умова нормальності розподілу ряду для побудови його економічної моделі не є обов'язковою. Регресія — функціональна залежність математичного сподівання залежної змінної від однієї або декількох інших пояснювальних (незалежних) змінних. Серед регресійних моделей можна виділити:

– *однопараметричні моделі*  $y = f(x)$  (що залежать від однієї змінної):

- лінійні вигляду  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ ;
- нелінійні (експоненціальна, степенева, квадратична, логістична тощо);

– *багатопараметричні моделі*  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon$  (залежність від декількох змінних):

- лінійні моделі вигляду  $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon$ , де  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — незалежні змінні;
- нелінійні моделі за змінними та параметрами.

### Моделі лінійної регресії

Якщо економічний процес можна подати за допомогою кількісних характеристик, між якими існує певна математична залежність, то цей процес може бути описаний в аналітичній формі через рівняння регресії. У такому випадку зв'язок між певними факторами та параметром, що досліджується (прибуток компанії), може бути показаний не лише у вигляді графіка, а і записаний з використанням емпіричної формули. Із використанням такого рівняння на основі набору вхідних ознак і може бути побудований прогноз цільової змінної, тобто виконане прогнозування методами регресійного аналізу.

*Лінійна множинна регресія* може бути подана таким чином [1]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon,$$

де  $y$  — залежна змінна;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — фактори (незалежні змінні);  $\varepsilon$  — випадкова похибка. Для кожного  $i$ -го спостереження залежність між змінними визначається так:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_n x_{in} + \varepsilon_i.$$

### Модель авторегресії з ковзним середнім

На практиці іноді буває доцільним уведення у модель як елементів авторегресії, так і складової ковзного середнього для того, щоб оцінити характеристики часового ряду, використовуючи меншу кількість параметрів. Такий

процес отримав назву авторегресії з ковзним середнім (АРКС( $p, q$ ) або ARMA( $p, q$ )) [1]:

$$y_t = \alpha_1 y_{t-1} + \alpha_2 y_{t-2} + \dots + \alpha_p y_{t-p} + \varepsilon_t - \beta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \beta_q \varepsilon_{t-q};$$

$$y_t (1 - \alpha_1 L - \alpha_2 L^2 - \dots - \alpha_p L^p) = \varepsilon_t (1 - \beta_1 L - \beta_2 L^2 - \dots - \beta_q L^q),$$

$$\beta(L) \varepsilon_t = \alpha(L) y_t,$$

де  $\alpha(L)$  — оператор авторегресії;  $\beta(L)$  — оператор ковзного середнього.

Описаний клас моделей є характерним для стаціонарних процесів. Проте на практиці більшість економічних і фінансових рядів є нестаціонарними. Тому необхідно застосовувати інший клас регресійних моделей, що враховують наявність трендової складової або змінної волатильності.

### Авторегресійна модель з інтегрованим ковзним середнім (АРІКС)

У 1970 р. Джордж Бокс та Гвілім Дженкінс [2] запропонували методику, яка дозволяє виділити клас нестаціонарних рядів, які за допомогою процедури взяття послідовних різниць можна звести до вигляду АРКС. Якщо після взяття  $d$  послідовних різниць ряд зводиться до стаціонарного вигляду, для прогнозування його рівнів можна застосувати комбіновану авторегресійну модель з інтегрованим ковзним середнім — АРІКС( $p, d, q$ ) або ARIMA( $p, d, q$ ) [3].

Методологія підбору моделі АРІКС для конкретного ряду спостережень складається із чотирьох етапів: вибір моделі, яка найбільше відповідає реальному процесу; оцінювання моделі — використання статистичних методів для отримання оцінок структури і параметрів моделі; тестування моделі — перевірка адекватності з використанням тестів на нормальний розподіл, автокореляцію залишків (тест Дарбіна-Уотсона), на якість специфікації моделі ( $F$ -тест); використання моделі для оцінювання прогнозу [1, 3]. Для того щоб оцінити невідомі параметри моделі АРКС( $p, q$ ), застосовують звичайний або нелінійний метод найменших квадратів, або метод максимальної правдоподібності. Параметри моделі оцінюються таким чином, щоб сума квадратів залишків була мінімальною.

### Сезонна авторегресійна модель з інтегрованим ковзним середнім (САРІКС)

Сезонна модель авторегресії з ковзним середнім, Seasonal ARIMA або SARIMA — це розширення авторегресійної моделі з інтегрованим ковзним середнім, яка дозволяє виконати оброблення одновимірних часових рядів даних із сезонною складовою. Модель включає також три нові гіперпараметри для уточнення порядку авторегресії (AR), диференціювання (I) та ковзного середнього (MA) для сезонної складової ряду, а також додатковий параметр, який показує порядок (періодичність) сезонності. Існують такі елементи тренду, які потребують додаткового налаштування для застосування моделі на практиці:  $p$  — порядок авторегресії тренду,  $d$  — порядок різниць для вилучення трендів,  $q$  — порядок ковзного середнього тренду. Сезонна частина моделі складається з елементів, які також потребують

налаштування:  $P$  — порядок сезонної авторегресії;  $D$  — порядок сезонних різниць;  $Q$  — порядок сезонного ковзного середнього;  $s$  — кількість часових кроків за один сезонний період. Формально модель SARIMA записується як  $SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)[s]$  і визначається таким чином:

$$\Phi_P(B^s)\phi_p(B)(1-B)^d(1-B^s)^D Z_t = \theta_q(B)\vartheta_Q(B^s)e_t,$$

де  $B$  — оператор зсуву, а

$$\Phi_P(B^s) = 1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_P B^{Ps},$$

$$\phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p,$$

$$\theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q,$$

$$\vartheta_Q(B^s) = 1 - \vartheta_1 B^s - \vartheta_2 B^{2s} - \dots - \vartheta_Q B^{Qs}.$$

Ця модель враховує сезонні ефекти, тому авторами запропоновано застосувати такий клас моделей для задачі прогнозування показників фінансової діяльності підприємства.

#### Моделі зі змінною волатильністю

Процеси, які не є стаціонарними, оскільки мають змінну дисперсію, називають гетероскедастичними. Це означає, що дисперсія процесу змінюється в часі, або є більш складною функцією часу і для створення моделі процесу потрібно знайти закон, за яким дисперсія змінюється. Іноді використовують припущення, що гетероскедастичність має таку форму:

$$\sigma_{\varepsilon(k)}^2 = k^2 x^2,$$

де  $k$  — константа, яку необхідно оцінити за допомогою експериментальних даних та вибраного методу оцінювання параметрів.

Для моделювання волатильності доходності фінансових активів на практиці часто використовують моделі умовної гетероскедастичності, її модифікації та узагальнення. *Авторегресійна умовно гетероскедастична модель* (АРУГ) або AutoRegressive Conditional Heteroscedasticity (ARCH) уперше згадується у праці Роберта Енгла [4] і полягає в тому, що дисперсія вільного члена  $\varepsilon_t$  у деякий момент часу  $t$  залежить від квадратів вільних членів попередніх моментів.

Тоді модель ARCH( $p$ ) є функцією, яка описує умовну дисперсію за допомогою квадратів попередніх значень спостережуваної величини і записується у вигляді

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i y_{t-1}^2,$$

де  $p$  — максимальний порядок АРУГ;  $\sigma_t$  — умовна дисперсія;  $y_{t-1}$  — попередні значення;  $\alpha_0, \alpha_i$  — параметри моделі і  $\alpha_0 > 0, \alpha_i \geq 0, i=1..p$ , оскільки дисперсія завжди має бути додатною, проте за великої кількості лагів ця умова може бути порушена.

Уведемо позначення  $v_t = y_t^2 - \sigma_t^2$  і запишемо модель ARCH( $p$ ) [5]:

$$y_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i y_{t-i}^2 + v_t.$$

Оскільки  $y_{t-i}$  і  $v_t$  теоретично є незалежними величинами, можна бачити, що модель відповідає моделі AR(p) для квадратів залишків.

Узагальнена авторегресійна умовно гетероскедастична модель (УАРУГ) (Generalized ARCH — GARCH модель) запропонована Тімом Боллерслевом [5] для моделювання волатильності, що залежить від часу. Вона містить значення попередніх умовних дисперсій, завдяки чому замість великих значень  $p$  моделі АРУГ(p) використовують невеликі значення  $p$  і  $q$ . Модель УАРУГ визначає умовну дисперсію як лінійну комбінацію  $p$  попередніх квадратів залишків і  $q$  лагів попередніх значень умовної дисперсії:

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \sum_{i=1}^p \alpha_i y_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^q \beta_j \sigma_{t-j}^2,$$

де  $\alpha_0, \alpha_i, \beta_j$  — параметри моделі,  $\alpha_0 > 0, \alpha_i \geq 0, i = 1..p, \beta_j \geq 0, j = 1..q$ .

Модель УАРУГ ( $p, q$ ) можна записати у вигляді

$$\sigma_t^2 = \alpha_0 + \alpha(L)y_{t-1}^2 + \beta(L)\sigma_{t-1}^2,$$

де  $\alpha(L), \beta(L)$  — поліноми оператора зсуву.

## ПІДГОТОВКА ДАНИХ ДО МОДЕЛЮВАННЯ

Реальні фінансово-економічні дані через певні збурення та випадкові впливи на фінансові процеси можуть мати пропуски даних, а самі ряди даних не відповідати очікуваним стійким закономірностям і розподілам. Тоді необхідно виконувати попередній аналіз і оброблення вхідних даних, які дозволяють здійснювати пошук стійких закономірностей, застосовувати методи згладжування або фільтрації даних з метою заміни фактичних значень прогнозними, що мають менший рівень коливань, зашумленості та кількості зайвої інформації. Одним з найпоширеніших оптимальних фільтрів є фільтр Калмана, який застосовується для обчислення оптимальних оцінок вектора стану і побудови короткострокових прогнозів, заснованих на обраних моделях [7]. На практиці досить поширеним є застосування цифрових фільтрів, які дозволяють перетворити дискретний набір вхідних даних  $x_t$  у дискретний набір вихідних даних  $y_t$  за допомогою лінійного співвідношення ви-

гляду  $y_t = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \alpha_i x_{t-i}$ . Цифрові фільтри використовують для розв'язання за-

дач стиснення та згладжування даних, усунення трендів, поділу часових рядів на компоненти, пробного оцінювання спектрів. Виділяють декілька видів цифрових фільтрів: ковзного середнього, експоненціального згладжування, поліноміальний фільтр, медіанний фільтр.

*Фільтр ковзного середнього* — фільтр зі скінченною кількісною характеристикою (на відфільтроване значення впливають лише  $N$  останніх значень), що базується на розрахунку середнього на певному ковзному інтервалі:



$$y_t = \sum_{i=0}^{N-1} \alpha_i x_{t+i},$$

де  $x_t$  — вхідний сигнал;  $y_t$  — вихідний сигнал;  $N$  — кількість точок, що використовується для обчислення ковзного середнього.

*Експоненціальне згладжування* (метод Хольта–Вінтерса) — фільтр, для якого на відфільтроване значення впливають усі попередні значення (з нескінченною імпульсною характеристикою). Перевагами фільтра є простота та здатність усувати великі скачки, а також немає потреби зберігати у пам'яті декілька попередніх значень.

Записують експоненціальний фільтр за допомогою рівняння:

$$y_t = \theta x_t + (1 - \theta)y_{t-1},$$

де  $x_t$  — обчислене значення у момент  $t$ ;  $y_t$  — відфільтроване значення у момент  $t$ ;  $\theta$  — коефіцієнт фільтрації, що набуває значень від 0 до 1. Серед експоненціальних фільтрів виділяють подвійний експоненціальний фільтр, застосування якого еквівалентне двом фільтрам першого порядку, та нелінійний фільтр, для якого  $\theta = \min\left[1, \frac{x_t - y_{t-1}}{R}\right]$ ,  $R$  — коефіцієнт налаштування фільтра.

У цьому експериментальному дослідженні було використано метод найближчих сусідів для відновлення пропусків даних, а після цього застосовано фільтр Калмана та метод Хольта–Вінтерса для фільтрації та згладжування даних [8]. Розглянемо детальніше основні етапи експериментального дослідження, яке проводилось авторами.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДОХІДНОСТІ КОМПАНІЇ

Для проведення досліджень обрано дані компанії Intel Corporation: звіти її фінансових результатів за 1975–2019 рр. та фінансові коефіцієнти [9], обчислені на їх основі. Для експериментального моделювання використано мову програмування для статистичного оброблення даних  $R$  та програмне середовище R Studio, зокрема бібліотеки: *tseries* (для роботи з часовими рядами), *forecast* (для побудови моделей типу AR, ARK, APIK), *rugarch* (для побудови моделей гетероскедастичних процесів), *DescTools*, *Metrics*, *lmttest* (для проведення статистичних тестів).

Аналізувались такі показники:

- $Y$  — Net revenue — виручка, обсяг товарів та послуг, помножений на їх ціну;
- $X_1$  — Earning per Share (EPS) — чистий прибуток компанії, розділений на середньозважену кількість випущених акцій протягом облікового періоду;
- $X_2$  — Gross Margin — коефіцієнт валового прибутку або маржинальності — частина загального обсягу виручки компанії, що залишається після відрахування прямих витрат, пов'язаних із виробництвом та реалізацією товару або послуги;

- $X_3$  — EBIT Margin — показник EBIT-маржинальності, використовується для визначення рентабельності;
- $X_4$  — Interest coverage ratio — коефіцієнт покриття відсотків — здатність позичальника покривати відсотки за позиками та облігаціями;
- $X_5$  — Return on Assets (ROA) — показник рентабельності активів, характеризує ефективність використання доступних активів для отримання виручки;
- $X_6$  — Return on Equity (ROE) — показник рентабельності власного капіталу, характеризує ефективність використання не всього капіталу підприємства, а тієї частини, що належить його власникам;
- $X_7$  — Assets Turnover Ratio — показник оборотності активів, визначає ефективність використання виробничих ресурсів.

Виконано прогнозування показника дохідності з використанням лінійної множинної регресії, авторегресії з ковзним середнім, авторегресії з інтегрованим ковзним середнім із застосуванням методів попереднього оброблення даних (зокрема, методів заповнення пропусків, фільтрації, згладжування) і на основі сукупності критеріїв для обрання кращої моделі. Для перевірки адекватності розроблених математичних моделей використовувались коефіцієнт множинної детермінації  $R^2$ , інформаційний критерій Акайке:

$$AIC = N \ln \left( \sum_{k=1}^N e^2(k) \right) + 2n \quad \text{та} \quad \text{критерій Байєса-Шварца:}$$

$$BSC = N \ln \left( \sum_{k=1}^N e^2(k) \right) + n \ln(N), \text{ де } n = p + q + 1 \text{ — кількість параметрів мо-$$

делі ( $p$  — кількість параметрів авторегресійної частини моделі);  $q$  — кількість параметрів ковзного середнього;  $N$  — довжина (потужність) вибірки. Критерії Акайке та Байєса-Шварца пов'язані з квадратом похибок, а тому мають бути мінімальними для кращої моделі. За критерії якості оцінок прогнозів для аналізу точності прогнозування фінансових показників обрано такі характеристики [1]:

$$\text{середню абсолютну похибку } MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|;$$

$$\text{середню відсоткову абсолютну похибку } MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \cdot 100;$$

$$\text{середній квадрат похибок } MSE = E((y - \hat{y})^2) = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N};$$

$$\text{коефіцієнт Гейла: } U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i)^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i)^2}}.$$

### Модель множинної регресії

Першим кроком побудови моделі є визначення основних регресорів. В експериментальному моделюванні було використано метод виключення, який передбачає, що на початковому етапі включаються всі фактори до моделі, оскільки достеменно невідомо, які з них є значущими, а далі послідовно по одному вилучаються фактори і перевіряється, чи покращується якість моделі. У разі, якщо якість моделі погіршується, виведений з моделі фактор повертається назад, а виводиться наступний фактор і т.д. Побудовано кореляційну матрицю і визначено суттєві показники для подальшої побудови моделі: Gross Margin, ICR, ROA, ROE, ANR, Price, які відповідають змінним  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ . Отримано таку модель множинної регресії:

$$Y = 8771,749 X_1 + 10,165 X_2 - 166,813 X_3 + 136,720 X_4 - 32,718 X_5 + \\ + 206,680 X_6 + 2755,078 + \epsilon$$

Значення критеріїв адекватності побудованої моделі:  $R^2 = 0,824$ ;  $DW = 0,676$ ;  $AIC = 3324,81$ ;  $BIC = 3350,3532$  показують, що лінійна модель є незадовільною, а оцінки прогнозів моделі виявились низькими, а тому вирішено не використовувати цю модель для подальшого дослідження.

### Побудова авторегресійних моделей

Побудова авторегресійних моделей для прогнозування фінансових показників на прикладі компанії Intel Corporation проводилась згідно з етапами, показаними на рис. 1.

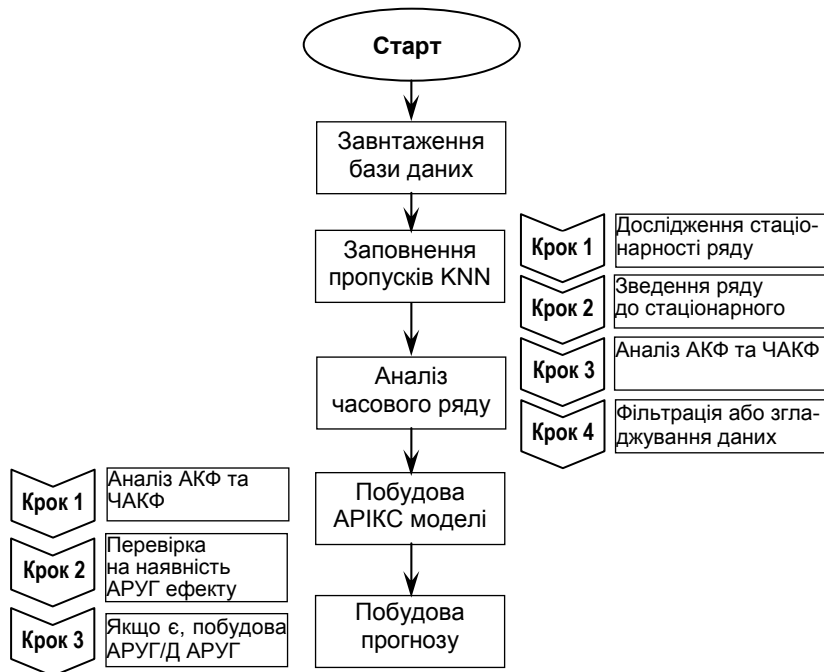


Рис. 1. Алгоритм побудови прогнозу фінансових показників на основі авторегресійних моделей

**Крок 1.** Дослідження стаціонарності ряду. Використовують такі статистичні тести, як розширений тест Дікі–Фуллера (ADF тест), Філіпса–Перрона (PP тест), Квятковського–Філіпса–Шмідта–Шина (KPSS тест) [3]. На основі отриманих експериментальних результатів для ряду цільової змінної Net Revenue отримано значення статистичних тестів, що свідчать про нестационарність ряду і необхідність використання більш складних моделей.

**Крок 2.** Візуальний аналіз ряду показав, що ряд є нестационарним, у моделі ймовірно наявний тренд першого або навіть другого порядку, тому ряд потребує певних додаткових маніпуляцій та оброблення. Існують декілька методів перетворення часового ряду (логарифмування, диференціювання — перехід до попарних різниць сусідніх значень ряду, та послідовне логарифмування із диференціюванням), метою яких є зведення ряду до стаціонарного. У випадках аналізу економічних та фінансових процесів найчастіше застосовують перетворення типу логарифмування, а потім беруть першу різницю. Це зумовлено тим, що для таких часових рядів характерне експоненціальне зростання, яке можна згладити за допомогою операції логарифмування, у той час як диференціювання стабілізує середнє значення ряду і дозволяє позбутися тренду та сезонності. Для часового ряду виконано відповідні перетворення, щоб звести його до стаціонарного (рис. 2).

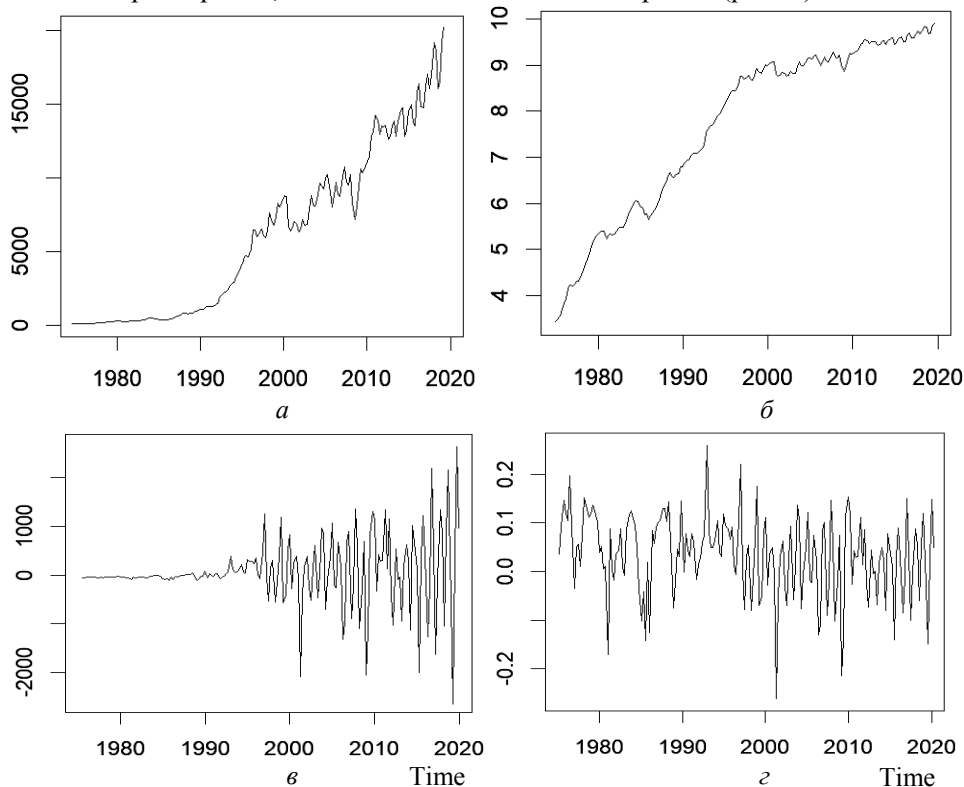


Рис. 2. Часовий ряд зміни фінансового показника Net Revenue: а — вхідні дані; б — прологарифмований Net Revenue; в — продиференційований Net Revenue; г — прологарифмований та продиференційований Net Revenue

**Крок 3.** Автокореляційна функція (АКФ) та часткова автокореляційна функція (ЧАКФ) прологарифмованого і прологарифмованого та продиференційованого ряду мають вигляд, показаний на рис. 3.

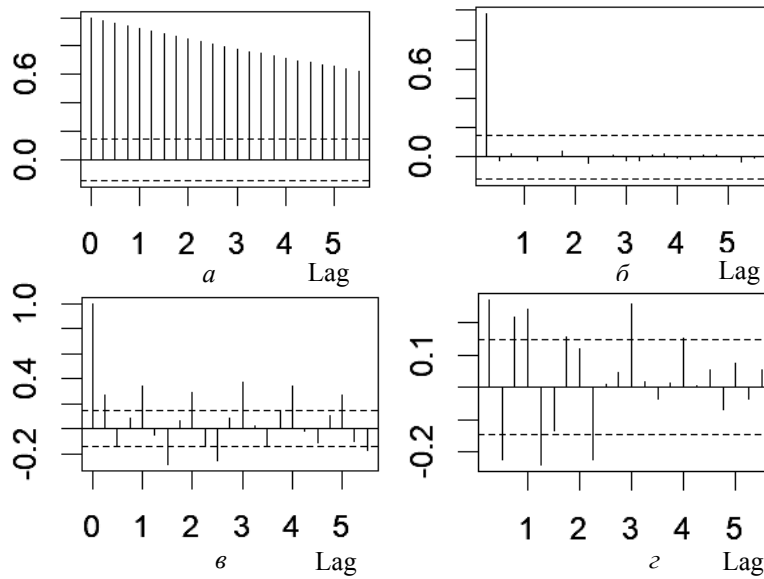


Рис. 3. а — АКФ; б — ЧАКФ прологарифмованого ряду; в — АКФ; г — ЧАКФ прологарифмованого та продиференційованого ряду

Аналіз ЧАКФ прологарифмованого та продиференційованого ряду показав, що значущими для моделі є лаги 0, 1, 2 і 3, тому відповідні лаги і мають бути включені в модель, а відповідні порядки моделей бути проаналізовані. Оскільки візуальний аналіз ряду свідчив про наявність тренду, то було виконано побудову низки моделей авторегресії з інтегрованим ковзним середнім. Специфіка обраних вхідних даних свідчить про наявність певної сезонної складової. Тому авторами було вирішено врахувати сезонну складову і побудувати сукупність сезонних авторегресійних моделей. Результати аналізу якості побудованих авторегресійних моделей наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз побудованих авторегресійних моделей

Модель	AIC	BIC
ARIMA(1,1,1)	-373,157	-363,6626
ARIMA(2,1,1)	-371,1632	-358,5041
ARIMA(0,1,2)	-373,2225	-363,7282
ARIMA(0,2,1)	-373,0245	-366,7064
ARIMA(1,2,0)	-315,3137	-308,9956
SARIMA(0,2,1)(2,0,1)[4]	-406,4964	-390,7011

Отже, найкращою моделлю виявилася сезонна авторегресійна модель з інтегрованим ковзним середнім SARIMA(0,2,1)(2,0,1)[4]. Саме рівняння сезонної авторегресійної моделі після перетворення має вигляд:  $(1 - \Phi_1 B^4 - \Phi_2 B^8)(1 - B)^2 Z_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \vartheta_1 B^4) e_t$  з такими значеннями її параметрів за сезонної та несезонної складових, відповідно:  $sar1 = 0,9005$ ,  $sar2 = 0,0506$ ,  $ma1 = -0,9849$ ,  $sma1 = -0,7649$ .

**Крок 4** — перевірка моделі на сталість дисперсії її залишків. Наявність авторегресійної умовної гетероскедастичності у залишків моделі можна перевірити за допомогою тестів Бокса та Льюнга–Бокса, нульовою гіпотезою

яких є випадковий розподіл даних. Значення критерію виявилось меншим за 0,05, а отже, на рівні впевненості 95% можна стверджувати, що для залишків характерна взаємна корельованість. Побудовано гетероскедастичні моделі (ARCH/GARCH) для залишків моделі SARIMA (табл. 2).

**Таблиця 2.** Порівняння гетероскедастичних моделей ARCH/GARCH

Модель	AIC	BIC
ARCH(1)	-2,4089	-2,3729
ARCH(2)	-2,4106	-2,3566
GARCH(1,1)	-2,3968	-2,3427
GARCH(1,2)	-2,3855	-2,3134
GARCH(2,1)	-2,3854	-2,3134
GARCH(2,2)	-2,3741	-2,2841

Найкращою моделлю за сукупністю критеріїв виявилася модель ARCH(2) із характеристиками:  $\omega=0,004598$ ,  $\alpha_1=0,018598$ ,  $\alpha_2=0,101433$  [1].

Виконано прогнозування показника Net Revenue на наступні 4 квартали з використанням регресійних моделей: обраної кращої моделі SARIMA(0,2,1)(2,0,1)[4], комбінації моделей SARIMA(0,2,1)(2,0,1)[4] + ARCH(2) для прогнозування абсолютного значення дохідності і опису залишків моделі SARIMA, і порівняння з іншими методами інтелектуального аналізу даних, зокрема моделі на основі МГУА та нейронних мереж [10], для прогнозування показника дохідності компанії Intel Corporation за 2019 р. Результати прогнозування, отримані за всіма методами, та їх порівняння з реальними значеннями наведено у табл. 3.

**Таблиця 3.** Порівняння якості оцінок прогнозу різними методами інтелектуального аналізу даних для прогнозування показника дохідності

Модель	MSE	MAE	MAPE	U
<b>Без попереднього оброблення і згладжування даних</b>				
SARIMA(0,2,1)(2,0,1)[4]	0,00386	0,05109	0,521%	0,00632
SARIMA(0,2,1)(2,0,1)[4] + ARCH(2)	0,00413	0,05152	0,526%	0,00653
МГУА	0,00948	0,08847	0,9%	0,00991
Авторегресійна нейронна мережа	0,00874	0,09063	0,926%	0,00955
<b>Із застосуванням методів попереднього оброблення і згладжування даних</b>				
Метод Хольта–Вінтерса SARIMA(1,2,2)(0,0,1)[4]	0,01882	0,13532	1,364%	0,01383
Метод Хольта–Вінтерса і SARIMA(1,2,2)(0,0,1)[4] + ARCH(4)	0,02647	0,16069	1,615%	0,01636
Метод Хольта–Вінтерса і МГУА	0,00402	0,05246	0,533%	0,00645
Метод Хольта–Вінтерса і авторегресійна нейронна мережа	0,00367	0,05085	0,517%	0,00617
Метод Калмана і SARIMA(2,2,3)(1,0,1)[4]	4,2e-05	0,00485	0,049%	0,00066
Метод Калмана і SARIMA(2,2,3)(1,0,1)[4] + ARCH(4)	6,04e-05	0,00568	0,058%	0,00079
Метод Калмана і МГУА	0,00095	0,02568	0,2632%	0,00316
Метод Калмана і авторегресійна нейронна мережа	0,00045	0,01633	0,167%	0,00217

Отже, найкращі результати прогнозування дохідності компанії без попереднього оброблення і згладжування отримано за допомогою сезонної моделі SARIMA(0,2,1)(2,0,1)[4], а найгірші — для моделі, побудованої на основі методу групового урахування аргумента. Найкращою моделлю після попереднього оброблення виявилась модель на основі застосування фільтрації методом Калмана і SARIMA(2,2,3)(1,0,1)[4]. Результати моделювання підтвердили доцільність застосування попереднього оброблення даних, якість прогнозування фінансових показників підвищилась на декілька порядків і досягла точності до п'ятого знака після коми.

## ВИСНОВКИ

Для розв'язання задачі вибору найкращих (адекватніших) моделей аналізу фінансової діяльності виконано аналіз квартальних звітів про фінансові результати компанії Intel Corporation за 1975–2019 рр. і розроблено такі математичні моделі: множинної регресії, авторегресії з інтегрованим ковзним середнім; сезонної авторегресії з інтегрованим ковзним середнім, моделі з умовною гетероскедастичністю, моделі на основі методу групового урахування аргументів та нейронних мереж. Було проведено дослідження, у яких попередньо оброблено вхідні дані із застосуванням згладжування та фільтрації даних методом Хольта–Вінтерса і фільтра Калмана, а пропуски заповнено методом найближчих сусідів. Під час проведення обчислювальних експериментів та розрахунків основних показників показано, що таке попереднє оброблення дало значне покращення адекватності всіх описаних моделей і дозволило підвищити прогнозні оцінки. Комбінація гетероскедастичних та сезонних авторегресійних моделей з інтегрованим ковзним середнім дозволяє здійснювати прогнозування для нестационарних рядів, характерних для фінансово-економічної діяльності, враховувати сезонні ефекти та отримувати прогнозні оцінки високої якості. Перспективним автори вважають застосування комбінованих моделей і інтегрованого підходу, запропонованого у праці [11]. Обраний у роботі математичний апарат регресійних моделей та проведене експериментальне дослідження показали ефективність і доцільність їх застосування для прогнозування макроекономічних та мікроекономічних індексів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. П.І. Бідюк, В.Д. Романенко, та О.Л. Тимошук, *Аналіз часових рядів: навч. посіб.* Київ: НТУУ «КПІ», 2013.
2. Дж. Бокс і Г. Дженкінс, *Анализ временных рядов, прогноз и управление*, пер. с англ. Москва: Мир, 1974.
3. Н.В. Кузнєцова та П.І. Бідюк, *Теорія і практика аналізу фінансових ризиків: системний підхід: моногр.* Київ: Вид-во «Ліра-К», 2020.
4. R.F. Engle, “Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation”, *Econometrica*, vol. 50, pp. 987–1007, 1982.
5. T. Bollerslev, “Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity”, *Journal of Econometrics*, vol. 31, pp. 307–327, 1986.
6. Л.Г. Саєтова, “Основные модификации ARCH моделей”, *Проблемы экономики и менеджмента*, № 6(34), с. 61–63, 2014.

7. М.З. Згуровский и В.Н. Подладчиков, *Аналитические методы калмановской фильтрации для систем с априорной неопределенностью*. Киев: Наукова думка, 1995.
8. N.V. Kuznietsova and P.I. Bidyuk, “Business Intelligence Techniques For Missing Data Imputation”, *Research bulletin of NTUU “KPI”*, no. 5, pp. 47–56, 2015.
9. Th.R. Robinson, H. Greuning, E. Henry, and M.A. Broihahn, *International Financial Statement Analysis*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2009, pp. 864.
10. М.З. Згуровский и Ю.П. Зайченко, *Основы вычислительного интеллекта*. Киев: Наукова Думка, 2013.
11. Н.В. Кузнецова, “Інтегрований підхід до оцінювання кредитних ризиків”, *Тр. Одес. политехн. ун-та*, вып. 1(33)–2(34), с. 187–192, 2010.

Надійшла 16.07.2020

### INFORMATION ON THE ARTICLE

**N.V. Kuznietsova**, ORCID: 0000-0002-1662-1974, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: natalia-kpi@ukr.net.

**Z.S. Chernysh**, ORCID: 0000-0002-5589-0018, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: zlata.chernysh@gmail.com.

**REGRESSION MODELS APPLICATION FOR ANALYSIS AND FORECASTING OF THE FINANCIAL ACTIVITY QUALITY INDICATORS OF THE COMPANY / N.V. Kuznietsova, Z.S. Chernysh**

**Abstract.** The company's success forecasting problem based on its financial indicators by regression models was studied in this research. Models based on linear multiple regression, autoregression with moving average, autoregression with integrated moving average, and seasonal model of autoregression with integrated moving average were built to predict the absolute value of financial indicators. An experimental study was performed on real data, and forecasting was made based on regression models. The models based on the method of group method of data handling and autoregressive neural network were developed. Heteroskedastic models with variable volatility such as ARCH and GARCH type were used to predict the volatility of the financial series. Preliminary data processing using the Holt-Winters method and the Kalman filter were applied to improve the model's quality and forecasting accuracy significantly. Authors suggested and developed a combination of seasonal autoregression with integrated moving average and heteroskedastic models that allowed them to consider the seasonal effects and trends inherent in the financial series and obtain high forecasts for financial indicators.

**Keywords:** regression models, seasonal autoregression model with integrated moving average, linear multiple regression, data processing, heteroskedastic models.

**ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФИНАНСОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КОМПАНИИ / Н.В. Кузнецова, З.С. Черныш**

**Аннотация.** Решена задача прогнозирования успешности деятельности компании на основе ее финансовых показателей на базе регрессионных моделей. Построено множество моделей: линейная множественная регрессия, авторегрессия со скользящим средним, авторегрессия с интегрированным скользящим средним и сезонная модель авторегрессии с интегрированным скользящим средним для прогнозирования абсолютных величин финансовых показателей. Проведено экспериментальное исследование на реальных данных и выполнено прогнозирование на базе регрессионных моделей, метода группового учета аргументов и авторегрессионной нейронной сети. Для прогнозирования волатильности финансового ряда применены гетероскедастических модели с пере-



менною волатильністю типу ARCH и GARCH. Выполнена предварительная обработка данных с использованием метода Хольта–Винтерса и фильтра Калмана, что позволило существенно улучшить качество моделей и точность прогнозирования. Предложена и разработана комбинация моделей сезонной авторегрессии с интегрированным скользящим средним и гетероскедастических, что позволило учесть имеющиеся сезонные эффекты и тренды, присущие финансовым рядам, и получить высокие прогнозные оценки для финансовых показателей.

**Ключевые слова:** регрессионные модели, сезонная модель авторегрессии с интегрированным скользящим средним, линейная множественная регрессия, предварительная обработка данных, гетероскедастические модели.

## REFERENCES

1. P.I. Bidyuk, V.D. Romanenko, and O. L. Timoshchuk, *Time Series Analysis*. Kyiv: Polytechnika, NTUU “KPI”, 2013.
2. G.E.P. Box and G.M. Jenkins, *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco: Holden-Day, 1970.
3. N.V. Kuznietsova and P.I. Bidyuk, *Theory and practice of financial risk analysis: systemic approach*. Kyiv: Lira-K, 2020.
4. R.F. Engle, “Autoregressive conditional heteroscedasticity with estimates of the variance of United Kingdom inflation”, in *Econometrica*, vol. 50, pp. 987–1007, 1982.
5. T. Bollerslev, “Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity”, in *Journal of Econometrics*, vol. 31, pp. 307–327, 1986.
6. L.G. Saetova, “The Main Modifications ARCH Models”, in *Problems of Economics and Management*, no. 6 (34), pp. 61–63, 2014.
7. M.Z. Zgurovsky and V.N. Podladchikov, *Analytical methods of Kalman filtering for systems with a priori uncertainty*. Kiev: Naukova Dumka, 1995.
8. N.V. Kuznietsova and P.I. Bidyuk, “Business Intelligence Techniques For Missing Data Imputation”, in *Research bulletin of NTUU “KPI”*, no. 5, pp. 47–56, 2015.
9. Th.R. Robinson, H. Greuning, E. Henry, and M.A. Broihahn, *International Financial Statement Analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2009.
10. M.Z. Zgurovsky and Y.P. Zaychenko, *The Fundamentals of Computational Intelligence*. Kyiv: Naukova Dumka, 2013.
11. N.V. Kuznyetsova, “Integrated approach to credit risks estimation”, in *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, no. 1(33)–2(34), pp. 187–192.

## **ВИКОРИСТАННЯ БАЙЄСОВИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ДОМШОК У ПОВІТРІ ЗА УМОВИ НЕТОЧНИХ ВХІДНИХ ДАНИХ**

**Р.В. КРИВАКОВСЬКА**

**Анотація.** Розглянуто питання оцінювання точності результатів моделювання поширення домішок у повітрі в разі подання на вхід моделей неточних вхідних даних. Наведено обмеження на методи оцінювання точності для України. Для отримання оцінок запропоновано використання байєсових мереж з дискретними вхідними змінними. Подано структуру мережі та запропоновано методи заповнення таблиць імовірностей.

**Ключові слова:** оцінювання стану атмосферного повітря, байєсові мережі довіри.

### **ВСТУП**

Питання забезпечення якості навколишнього середовища стають дедалі більш важливими. Підвищення антропогенного і техногенного навантаження на навколишнє середовище призводить до його деградації, що, у свою чергу, може спричинити негативні наслідки для здоров'я населення.

Проектуючи системи оцінювання стану повітря, слід враховувати той факт, що вхідні дані, які подаються на вхід системи, як правило, неточні. Ігнорування цього факту у процесі побудови систем прийняття рішень, пов'язаних із забезпеченням належної якості повітря, може зумовити неправильні рішення.

Постає проблема визначення точності моделювання у випадку неточних вхідних даних. Неточність результатів моделювання може виникати через недосконалість моделей.

У разі роботи з оцінювання якості атмосферного повітря в Україні з'являються додаткові вимоги, що накладаються на методи. Дані спостережень і потужності викидів часто подаються не повністю, і часто доступні тільки усереднені значення числових характеристик. Тому до методу оцінювання достовірності вхідних даних ставляться такі вимоги:

- 1) простота;
- 2) можливість роботи з невеликими наборами даних;
- 3) орієнтація на спрощування інформації в умовах невизначеності.

Байєсові мережі широко використовують в екології для вибору стратегій, діагностики і прогнозування [2, 3]. Схожа за принципом роботи фільтрація Калмана і її модифікації широко застосовуються в екологічних завданнях для поліпшення якості моделювання шляхом засвоєння даних спостережень [4–6]. Перевагою байєсових мереж є також їх здатність до навчання [7].

## **ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ**

Розглянемо інформаційну систему оцінювання якості повітря в умовах України. Нехай її частиною буде підсистема моделювання, на вхід якої надходять невеликі набори неточних вхідних даних. Необхідно отримати оцінки точності результатів моделювання поширення домішок у приземному шарі атмосферного повітря, якщо відомі відносні відхилення вхідних даних для моделі. Також належить оцінити точність вхідних даних моделі, якщо відомі відносні похибки результатів моделювання.

## **СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ**

Для отримання ймовірнісних оцінок достовірності результатів моделювання за неточних вхідних даних можна використовувати байєсові мережі довіри. Цю технологію використовують для проведення ймовірнісних міркувань [1].

Їх переваги для вирішення завдань цього типу такі:

1. Умовні ймовірності можна обчислювати один раз або отримувати ітеративно за допомогою навчання залежно від кількості наявних даних.
2. Це досить проста модель, для якої існують правила виведення.
3. Ця модель призначена для роботи в умовах невизначеності.

Основні етапи побудови байєсової мережі:

1. Побудова структури мережі: вивчення предметної галузі, виділення факторів і знаходження залежності між ними.
2. Визначення значень вузлів мережі: вибір значень змінних-вузлів мережі, визначення їх типу (дискретні, неперервні).
3. Заповнення таблиць умовних імовірностей станів. Значення умовних імовірностей можна знаходити за допомогою:

- експертних оцінок;
- статистичної інформації, отриманої раніше.

Після виконання основних етапів отримуємо готову мережу, яку можна використовувати для проведення експериментів.

Наступним етапом у роботі буде заповнення мережі значеннями умовних імовірностей. Заповнення таблиць умовної ймовірності можна починати з перевірки адекватності моделі. Для цього зазвичай використовують дані високої (або принаймні визначеної) точності.

Для отримання значень умовних імовірностей можна використовувати дані, отримані від експертів, або інші методи. Наприклад, для байєсової мережі це може бути такий підхід:

1. Порівняння результатів моделювання з даними з постів спостереження. Припускається, що ступінь достовірності даних на постах спостереження дорівнює відсотковому відношенню похибки вимірювання до результату спостереження.
2. На основі порівняння даних знаходження значень умовної ймовірності і занесення їх у таблицю.

Якщо адекватність перевіряється шляхом порівняння даних моделювання з даними з пунктів спостереження за станом атмосферного повітря, то одразу можна визначити відносне відхилення результатів моделювання від даних спостережень для всіх точок спостережень. Відхилення будуть коливатися у певних межах.

Якщо модель є адекватною, можна визначити відсоток точок спостереження, у яких відхилення матимуть різні межі. Далі цей відсоток можна перевести в апостеріорну (умовну) ймовірність. Так можна отримати значення умовних імовірностей для даних високої достовірності.

Якщо дані інвентаризації емісій неповні і модель вважається адекватною для спостережень у точках, у яких вплив неврахованих викидів мінімальний, то для точок зі значним впливом неврахованих викидів можна припустити сумарну недостовірність викидів середньою або високою. Виходячи з цього, можна знайти частоту появи даних середнього або високого ступеня недостовірності і обрахувати відповідні значення умовних імовірностей.

Для врахування впливу погодних умов на результати моделювання можна вдатися до пробних запусків моделі або скористатися даними інших учених, які проводили подібні дослідження.

Якщо використовуються відомі моделі, для них зазвичай проводилися дослідження впливу неточності даних на результати моделювання і тому можна побудувати таблиці умовних імовірностей за цими даними. Для невідомої моделі можна брати дані дослідження найбільш близьких до неї моделей.

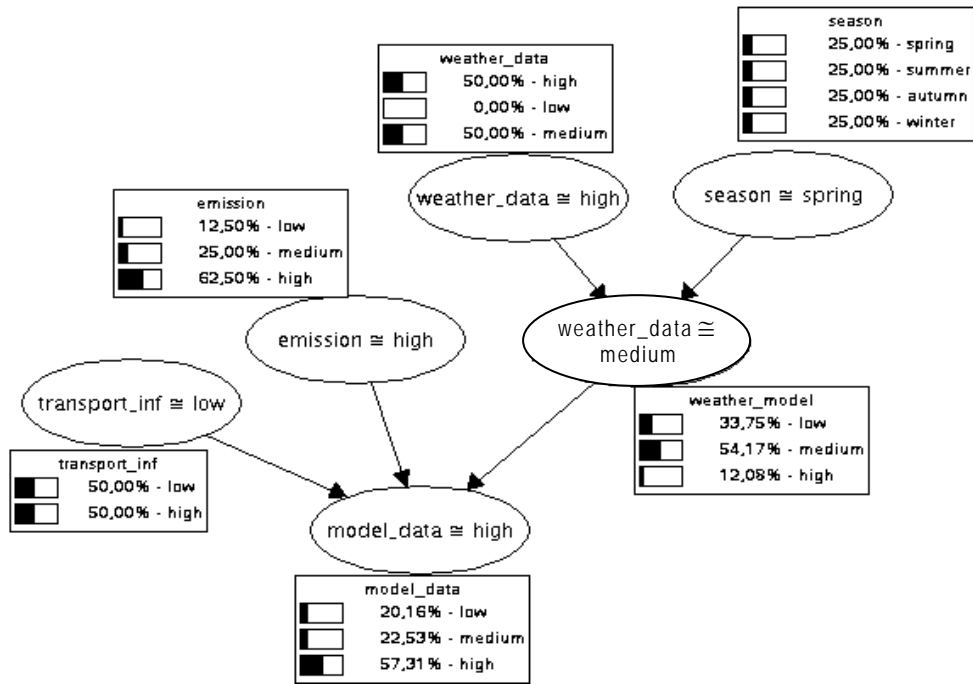
Якщо використовується моделювання для вирішення завдань, нагромаджується статистика запусків, яка придатна для уточнення значень у таблицях умовних імовірностей.

Якщо відомі значення умовних імовірностей, то можна досліджувати ймовірності у зворотному напрямку. Фіксуючи значення результуючої змінної, можна обчислити ймовірності значень вхідних змінних згідно з таблицями умовних імовірностей.

Пропонується структура мережі, показана на рисунку.

Після визначення структури мережі можна визначати значення змінних. У байєсовій мережі довіри використовують як дискретні, так і неперервні змінні. У розгляданому випадку використано дискретні значення змінних, оскільки з ними працювати простіше.

Один блок мережі відповідає одній змінній. Кожна змінна являє собою джерело неточності, яке впливає на точність результатів моделювання поширення домішок. Кожна змінна мережі (крім змінних *season* і *transport\_inf*) може набувати трьох значень: *low*, *medium*, *high* з міркувань балансу між зручністю використання і точністю, що відповідають рівням якості вхідних даних або результатів моделювання. Ці рівні вибрано на основі аналізу відносних відхилень результатів моделювання від даних з пунктів спостереження. Числові значення, що відповідають рівням якості, задаються користувачем системи.



Структура мережі довіри: weather\_data — достовірність метеорологічних даних; season — пора року; weather\_model — достовірність результатів метеорологічної моделі; emission — достовірність значень викидів від точкових джерел; transport\_inf — вплив транспорту; model\_data — значення достовірності результатів моделювання поширення домішок у приземному шарі атмосфери

У таблиці наведено значення змінних.

**Змінні, що використовуються в байсовій мережі довіри**

Змінна	season	weather_data	weather_model	emission	transport_inf	model_data
Список значень	spring, summer, autumn, winter	low, medium, high	low, medium, high	low, medium, high	low, high	low, medium, high
Опис	Пора року	Достовірність вхідних даних погодної моделі	Достовірність вхідних даних погодної моделі (залежно від ступеня достовірності вхідних даних)	Достовірність даних про викиди	Дані про забруднення від транспорту	Достовірність результатів моделювання

**ВИСНОВКИ**

Дослідження присвячено оцінюванню точності моделювання поширення домішок у приземному шарі атмосферного повітря за неточних вхідних да-

них. Розглянуто обмеження, що виникають у цій задачі для умов України. Задача розв'язується за допомогою побудови байесової мережі довіри і подальшого заповнення таблиць умовних імовірностей експертом. Така модель дозволяє отримати ймовірнісні характеристики для точності результатів моделювання залежно від точності вхідних даних, а також отримати ймовірності різних ступенів точності вхідних даних, якщо відомий рівень точності результатів моделювання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. С. Рассел, П. Норвиг, *Искусственный интеллект: современный подход*, пер. с англ. Москва: «Вильямс», 2006.
2. S. Johnson, "Integrated Bayesian Network frameworks for modeling complex ecological issues", *PhD thesis*, 2009.
3. Eugene Santos Jr., "Validation and verification of Bayesian knowledge-bases", *Data & Knowledge Engineering*, vol. 37, pp. 307–329, 2001.
4. R.E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, pp. 35–45, 1960.
5. D.Q. Zheng, "Online update of model state and parameters of a Monte Carlo atmospheric dispersion model by using ensemble Kalman filter", *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 12, pp. 2005, 2009.
6. М.А. Толстых, *Применение ансамблевых фильтров Калмана в численном прогнозе погоды* [Електронний ресурс]. Доступно: [ftp://geophyslab.srcc.msu.ru/Events/CITES2009/Tolstykh\\_090709.pdf](ftp://geophyslab.srcc.msu.ru/Events/CITES2009/Tolstykh_090709.pdf)
7. D. Heckerman, "A Tutorial on Learning with Bayesian Networks", *Technical Report MSR-TR-95-06, Microsoft Research*, 1995.

Надійшла 04.04.2019

## INFORMATION ON THE ARTICLE

**R.V. Kryvakovska**, programmer, "Mama Products" Ltd, Ukraine, e-mail: deyatynor@gmail.com.

**APPLICATION OF BAYESIAN NETWORKS FOR ACCURACY ESTIMATION OF MODELING RESULTS OF THE AIR POLLUTION DISPERSION GIVEN INACCURATE INPUT DATA / R.V. Kryvakovska**

**Abstract.** The article deals with estimating the results accuracy of the modeling of air pollution dispersion when introducing inaccurate input data. Restrictions on accuracy estimation methods for Ukraine are considered. It is suggested to use Bayesian networks with discrete input variables to obtain the estimates. The structure of the network is presented, and the methods of filling the probability tables are proposed.

**Keywords:** atmospheric air assessment, Bayesian networks.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ВОЗДУХЕ ПРИ УСЛОВИИ НЕТОЧНЫХ ВХОДНЫХ ДАННЫХ / Р.В. Криваковская**

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос оценки точности результатов моделирования распространения примесей в воздухе при подаче на вход моделей неточных входных данных. Приведены ограничения на методы оценки точности для Украины. Для получения оценок предложено использование байесовских сетей с дискретными входными переменными. Подана структура сети и предложены методы заполнения таблиц вероятностей.

**Ключевые слова:** оценка состояния атмосферного воздуха, байесовы сети доверия.

## REFERENCES

1. Stuart Russell and Peter Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4th Edition, Hoboken, USA: Pearson, 2020.
2. S. Johnson, "Integrated Bayesian Network frameworks for modeling complex ecological issues", PhD thesis, 2009.
3. Eugene Santos Jr., "Validation and verification of Bayesian knowledge-bases", *Data & Knowledge Engineering*, vol. 37, pp. 307–329, 2001.
4. R.E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, pp. 35–45, 1960.
5. D.Q. Zheng, "Online update of model state and parameters of a Monte Carlo atmospheric dispersion model by using ensemble Kalman filter", *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 12, pp. 2005, 2009.
6. M.A. Tolstykh, Application of ensemble Kalman filters in numerical weather forecast [Online]. Available: [ftp://geophyslab.srcc.msu.ru/Events/CITES2009/Tolstykh\\_090709.pdf](ftp://geophyslab.srcc.msu.ru/Events/CITES2009/Tolstykh_090709.pdf) Accessed on: January 16, 2016.
7. D. Heckerman, "A Tutorial on Learning with Bayesian Networks", *Technical Report MSR-TR-95-06, Microsoft Research*, 1995.

**FUZZY PORTFOLIO OPTIMIZATION PROBLEM UNDER  
UNCERTAINTY CONDITIONS WITH APPLICATION  
OF COMPUTATIONAL INTELLIGENCE METHODS**

**H. ZAYCHENKO, YU. ZAYCHENKO**

**Abstract.** The problem of constructing an optimal securities portfolio under uncertainty is considered along with the direct and dual problems of fuzzy portfolio optimization. The modified fuzzy portfolio optimization problem is also suggested under a constraint on portfolio volatility. In the dual problem, the portfolio structure is determined, which provides the minimum risk level at the specified profitability level. The use of forecasting share prices for the portfolio model was suggested to support the validity of decisions on the portfolio structure and to reduce the risks. The share price data for the portfolio optimization system are forecasted using Fuzzy Group Method of Data Handling (FGMDH). The experimental studies of the suggested fuzzy models were carried out, and a comparison with the Markowitz model was performed on a stock market. As the result of this work, the foundations of the theory of fuzzy portfolio optimization are built on the basis of the theory of fuzzy sets and an effective forecasting method.

**Keywords:** fuzzy portfolio, modified fuzzy portfolio optimization model, forecasting, share prices, fuzzy GMDH.

**INTRODUCTION**

The problem of investment in securities had arisen with appearance of the first stock markets. Careful processing and accounting of investment risks have become an integral and important part of the success of each company. However, more and more companies have to make decisions under uncertainty, which may lead to undesirable results. Particularly serious consequences may have the wrong decisions at long-term investments. Therefore, early detection, adequate and the most accurate assessment of risk is one of the crucial problems of modern investment analysis.

The beginning of modern investment theory was put in the article H. Markowitz, “Portfolio Selection”, which was published in 1952. In this article mathematical model of optimal portfolio of securities was first proposed. Methods of constructing such portfolios under certain conditions are based on theoretical and probabilistic formalization of the concept of profitability and risk. For many



years the classical theory of Markowitz was the main theoretical tool for optimal investment portfolio construction, after which most of the novel theories were only modifications of the basic theory.

New approach in the problem of investment portfolio construction under uncertainty is connected with fuzzy sets theory, created about half a century ago in the fundamental work of Lotfi Zadeh [6]. By using fuzzy numbers in the forecast share prices a decision-making person was not required to form probability estimates.

The application of fuzzy sets technique enables to create a novel theory of fuzzy portfolio optimization under uncertainty and risk deprived of drawbacks of classical portfolio theory.

The main source of uncertainty is changing stock prices of securities at the stock market as the decision on portfolio is based on current stock prices while the implementation of portfolio is performed in future and portfolio profitability depends on future prices which are unknown at the moment of decision making. Therefore that to raise the reliability of decision concerning portfolio and cut possible risk it's needed to forecast future prices of stocks. For this the application of inductive modeling method, so-called Fuzzy Group Method of Data Handling (FGMDH) seems to be very perspective.

The goals of this paper are to present and analyze the results in fuzzy portfolio optimization theory, to consider and analyze so-called classic and new direct problems of fuzzy portfolio optimization, to estimate the application of FGMDH for stock prices forecasting and to carry out experimental investigations for estimation of the efficiency of the elaborated theory.

## **DIRECT PROBLEM OF FUZZY PORTFOLIO OPTIMIZATION**

### **Problem statement**

Let us consider a share portfolio of  $N$  components and its expected behaviour at time interval  $[0, T]$ . Each of a portfolio component  $i = \overline{1, N}$  at the moment  $T$  is characterized by its financial profitability  $r_i$  (evaluated at a point  $T$  as a relative increase in the price of the asset for this period) Assume the capital of the investor be equal 1. The problem of share portfolio optimization consists in a finding of a vector of share prices distribution in a portfolio  $x = \{x_i\} i = \overline{1, N}$  maximizing the expected income at the set risk level.

In process of practical application of Markowitz model its drawbacks were detected [2, 3]:

- The hypothesis about normality of profitability distributions usually isn't proved in practice.
- Stationarity of price processes is not always valid in practice.
- At last, the risk of stocks is considered as a covariance or its volatility, therefore the decrease in profitability in relation to the expected value, and profitability increase are estimated in this model absolutely equally, while for the owner of securities these events are absolutely different.

These weaknesses of Markowitz theory caused necessity of development essentially new approach for definition of an optimum investment portfolio.

Let's consider the main principles and ideas of a fuzzy method for portfolio optimization [1, 2, 3, 4].

The risk of a portfolio is not its volatility (covariance), but possibility that expected profitability of a portfolio will appear below some pre-established planned value  $r^*$ .

Correlation of stock prices in a portfolio is not considered and not taken into account.

Profitability of each security is not random, but fuzzy number. Similarly, restriction on extremely low level of profitability can be both usual scalar and fuzzy number of any kind. Therefore, optimize a portfolio in such statement may mean, in that specific case, the requirement to maximize expected profitability of a portfolio in time moment  $T$  at the fixed risk level.

Profitability of a security on termination of ownership term is expected to be equal  $r$  and lies in a certain range.

For  $i$ -th security let's denote:

$\bar{r}_i$  — the expected profitability of the  $i$ -th security;

$r_{1i}$  — the lower border of profitability of the  $i$ -th security;

$r_{2i}$  — the upper border of of the  $i$ -th security;

$r_i = (r_{1i}, \bar{r}_i, r_{2i})$  — profitability of the  $i$ -th security is a triangular or Gaussian fuzzy number.

Then profitability of a portfolio is equal:

$$r = \left( r_{\min} = \sum_{i=1}^N x_i r_{1i}; \bar{r} = \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i; r_{\max} = \sum_{i=1}^N x_i r_{2i} \right), \quad (1)$$

where  $x_i$  is the weight of  $i$ -th security in a portfolio ( its portion), for which the following conditions holds

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1, \quad 0 \leq x_i \leq 1. \quad (2)$$

Critical level of profitability of a portfolio at the moment of  $T$  given by an investor may be non-fuzzy or fuzzy number  $r^* = (r_1^*, \bar{r}^*, r_2^*)$  as well.

### Fuzzy-set portfolio optimization with triangular membership functions

To determine the structure of a portfolio which provides the maximum profitability at the set risk level, it is required to solve the following problem [2, 3].

Find  $\{X_{\text{opt}}\} = \{X\}$ , for which  $r \rightarrow \max$ , under condition  $\beta(X) = \text{const}$ , where  $r$  is a portfolio profitability,  $\beta$  is a desired risk, vector  $X$  satisfies (2).

In [2, 3] the following expression for risk  $\beta(x)$  was obtained for critical value  $r^*$

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^N x_i r_{i2} - \sum_{i=1}^N x_i r_{i1}} \left( \left( r^* - \sum_{i=1}^N x_i r_{i1} \right) + \left( \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i - r^* \right) \ln \left( \frac{\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i - r^*}{\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i - \sum_{i=1}^N x_i r_{i1}} \right) \right) = \beta. \quad (3)$$

Taking into account also that profitability of a portfolio is equal to:

$$r = \left( r_{\min} = \sum_{i=1}^N x_i r_{1i}; \bar{r} = \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i; r_{\max} = \sum_{i=1}^N x_i r_{2i} \right),$$

where  $(r_{1i}, \bar{r}_i, r_{2i})$  is the profitability of  $i$ -th security, we obtain the following optimization problem [2, 3]:

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i \rightarrow \max; \tag{4}$$

$$\beta = \text{const}; \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1, x_i \geq 0, i = \overline{1, N}. \tag{6}$$

At a risk level variation  $\beta$  3 cases are possible:  $\beta = 0$ ,  $\beta = 1$  and  $0 < \beta < 1$ . Consider in detail the last case  $0 < \beta < 1$ .

This case is possible when  $\sum_{i=1}^N x_i r_{1i} \leq r^* \leq \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i$  or when  $\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i \leq r^* \leq \sum_{i=1}^N x_i r_{2i}$ .

Assume  $\sum_{i=1}^N x_i r_{1i} \leq r^* \leq \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i$ . Then using (3) the problem (4)–(6) is reduced to the following nonlinear programming problem [2–5]:

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i \rightarrow \max. \tag{7}$$

Under conditions

$$\frac{1}{\sum_{i=1}^N x_i r_{2i} - \sum_{i=1}^N x_i r_{1i}} \left( \left( r^* - \sum_{i=1}^N x_i r_{1i} \right) + \left( \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i - r^* \right) \ln \left( \frac{\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i - r^*}{\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i - \sum_{i=1}^N x_i r_{1i}} \right) \right) = \beta; \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^N x_i r_{1i} \leq r^*; \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i > r^*; \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1, x_i \geq 0, i = \overline{1, N}. \tag{11}$$

Let  $\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i \leq r^* \leq \sum_{i=1}^N x_i r_{2i}$ . Then the problem (9)–(11) is reduced to the following nonlinear programming problem [2–5]:

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i \rightarrow \max; \tag{12}$$

$$-\left(r^* - \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i\right) * \ln \left( \frac{r^* - \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i}{\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_{i2} - \sum_{i=1}^N x_i r_{i1}} \right) * \frac{1}{\sum_{i=1}^N x_i r_{i2} - \sum_{i=1}^N x_i r_{i1}} = \beta ; \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i r_{i2} > r^* ; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i \leq r^* ; \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1, x_i \geq 0, i = \overline{1, N}. \quad (16)$$

The penalty functions algorithm of minimization is suggested to find the solution of problems (7)–(11) and (12)–(16). Assume both problems (7)–(11) and (12)–(16) be solvable. Then structure of a required optimal portfolio will be such vector  $X = \{x_i\} i = \overline{1, N}$  being the solution of problems (7)–(11) or (12)–(16) for which the criterion value will be greater.

### Modified fuzzy portfolio optimization under constraint on volatility

Analysis of fuzzy portfolio optimization model (7)–(10) and previous experimental results [2–5] has shown that the constraint on risk in fuzzy portfolio model doesn't make real restriction of profitability and acts in the same way as criterion: the less risk the greater is profitability.

It leads to some bias in portfolio content, usually the portion of the most profitable share takes the greatest value and practically doesn't change with risk variation. Therefore it was suggested to modify fuzzy portfolio model by introducing the constraint on portfolio volatility  $\Delta_{giv}$  :

$$\sum_{i=1}^N x_i (r_{i2} - r_{i1}) \leq \Delta_{giv} ;$$

where

$$\Delta_{giv} = \text{var}, \Delta_{giv} : (r_{i2} - r_{i1}) \text{ min} \div (r_{i2} - r_{i1}) \text{ max} .$$

Using this transformation we obtain two linear programming problems presented below:

a) for the case  $\sum_{i=1}^N x_i r_{i1} \leq r^* < \sum_{i=1}^N x_i \tilde{r}_i$ ,

LP-problem takes the following form:

$$\tilde{r} = \sum_{i=1}^N x_i \tilde{r}_i \rightarrow \text{max};$$

$$\sum_{i=1}^N x_i (r_{i2} - r_{i1}) \leq \Delta_{\text{giv}};$$

$$\sum_{i=1}^N x_i r_{i1} \leq r^*;$$

$$\sum_{i=1}^N x_i \tilde{r}_i \geq r^*;$$

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1, \quad x_i \geq 0, \quad i = \overline{1, N};$$

$$\Delta_{\text{giv}} \in [(r_2 - r_1) \min \div (r_2 - r_1) \max];$$

b) for the case  $\sum_{i=1}^N x_i \tilde{r}_i \leq r^* < \sum_{i=1}^N x_i r_{i2}$ , we obtain the following

LP-problem:

$$\tilde{r} = \sum_{i=1}^N x_i \tilde{r}_i \rightarrow \max;$$

$$\sum_{i=1}^N x_i (r_{i2} - r_{i1}) \leq \Delta_{\text{giv}};$$

$$\sum_{i=1}^N x_i r_{i2} \geq r^*;$$

$$\sum_{i=1}^N x_i \tilde{r}_i \leq r^*;$$

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1, \quad x_i \geq 0, \quad i = \overline{1, N},$$

where

$$\Delta_{\text{giv}} \in [(r_2 - r_1) \min \div (r_2 - r_1) \max].$$

If both these LP-problems are solvable then the structure optimal invest portfolio  $x = \{x_i\} \quad i = \overline{1, N}$  will be determined for which the portfolio profitability will be greater.

#### THE ANALYSIS AND COMPARISON OF THE RESULTS BY MARKOWITZ AND FUZZY-SETS MODELS

For comparative analysis of investigated methods the following corporations Apple INC, Cisco, Intel, Microsoft, Visa. were chosen whose shares are presented in stock- exchange NYSE and used for Dow Jones index calculation. The information about share prices of these corporations were taken from site <https://www.nyse.com>. The data about share prices were taken in the period from 01.01.2018 to 29.06.2018 year, in a whole the period of 125 days.

The obtained data from NYSE contained the information about opening and closing share prices of the chosen companies.

For fuzzy portfolio optimization the calculated profitability range (region) and expected profitability value were previously calculated for each share. In Markowitz model expected profitability of a share is calculated as a mean  $m = M\{r\}$  and risk of an asset is considered as a dispersion of the profitability value.

Using this data for all stocks the following indicators were calculated: 1) mean profitability, 2) left bound of profitability  $r_{\min}$ , 3) right bound  $r_{\max}$  4) profitability range (volatility)  $\Delta_{\text{ад}}$  and variance  $\sigma^2$ . These data are presented in the table 1.

**Table 1.** Shares Profitability, volatility, and variance

N	Company	$\tilde{r}$ , %	$r_{\min}$	$r_{\max}$	$\Delta_{\text{giv}}$	$\sigma^2$
1	APPLE INC	0,0735	-0,9585	0,8700	1,8285	1,6015
2	CISCO SYS INC	0,0932	-0,8681	0,9564	1,8245	1,7895
3	INTEL CORP	0,0643	-1,3545	1,1903	2,5348	2,8340
4	MICROSOFT CORP	0,1183	-0,9063	0,8227	1,7290	1,3972
5	VISA INC	0,1255	-0,8200	0,6976	1,5176	1,1478

### Portfolio optimization for Markowitz model

Construct mathematical model of Markowitz using (7)–(11). Number of shares in a portfolio equals to 5. Choose the initial risk level  $\beta = 0,5$ . Then at each step increasing risk by 0,5 consider and solve models for risk value from 0,5 to 4,5. For its solution penalty functions method was applied and software kit in program language C# was developed. The obtained results for risk values  $\beta \in (0,5 \div 4,5)$  with step 0,5 are presented in the table 2.

**Table 2.** Portfolio constructed by Markowitz model for different risk levels

N	Risk $\beta$	Profitability	Shares				
			APPLE INC	CISCO SYS INC	INTEL CORP	MICRO SOFT CORP	VISA INC
1	0,5	0,0928	0,2491	0,1491	0,0745	0,0745	0,3745
2	1,0	0,0940	0,2529	0,1529	0,0767	0,0764	0,3764
3	1,5	0,0969	0,2581	0,1513	0,0833	0,0830	0,3830
4	2,0	0,0981	0,2643	0,1643	0,0908	0,0908	0,3908
5	2,5	0,0988	0,2635	0,1635	0,0862	0,0862	0,3862
6	3,0	0,1005	0,4296	0,0294	0,1125	0,0875	0,3875
7	3,5	0,1022	0,3852	0,0852	0,1137	0,0862	0,3862
8	4,0	0,1022	0,3852	0,0852	0,1137	0,0862	0,3862
9	4,5	0,1022	0,3852	0,0852	0,1137	0,0862	0,3862

The corresponding dependence “profitability/risk” for Markowitz model based on this data is presented in the fig. 1.

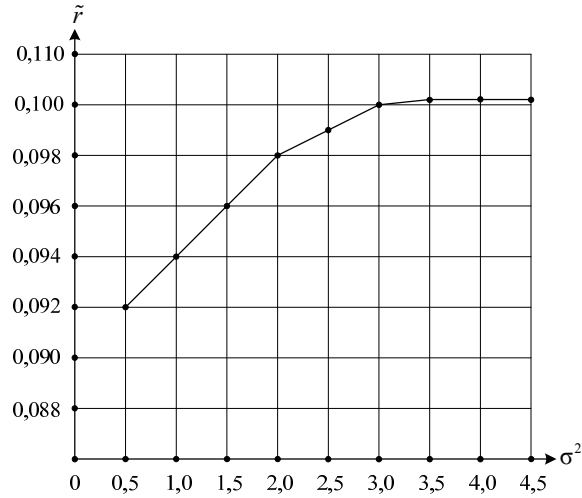


Fig. 1. Dependence profitability versus risk for optimal portfolio by Markowitz

### Fuzzy portfolio optimization model

As it was stated previously for fuzzy portfolio with risk variation there are three different cases. Consider the case  $0 < \beta < 1$  when  $\sum_{i=1}^N x_i r_{i1} \leq r^* < \sum_{i=1}^N x_i \tilde{r}_i$ .

Let solve fuzzy portfolio problem for this case. The corresponding expression for risk  $\beta(X)$  is presented in (8). As critical value for risk take  $r^* = 0,08$ .

The following model is non-linear programming problem. For its solution penalty functions method was applied. This problem was solved using developed software kit in language C# for risk values  $\beta:(0,1 \div 0,9)$  with step 0,1 and the results are presented in the table 3.

Table 3. Optimal portfolios for fuzzy model for different risk values

N	Risk $\beta$	Profitability	Assets				
			APPLE INC	CISCO SYS INC	INTEL CORP	MICROSOFT CORP	VISA INC
1	0,1	0,0983	0,2406	0,1343	0,0750	0,1375	0,3750
2	0,2	0,0973	0,2355	0,1355	0,0722	0,1361	0,3722
3	0,3	0,0959	0,2307	0,1307	0,0696	0,1348	0,3696
4	0,4	0,0945	0,2261	0,1261	0,0672	0,1336	0,3672
5	0,5	0,0932	0,2271	0,1217	0,0648	0,1324	0,3648
6	0,6	0,0904	0,2154	0,1154	0,0577	0,1288	0,3577
7	0,7	0,0893	0,2116	0,1116	0,0558	0,1279	0,3558
8	0,8	0,0882	0,2079	0,1079	0,0539	0,1269	0,3539
9	0,9	0,0872	0,2045	0,1045	0,0522	0,1261	0,3522

The corresponding dependence profitability/risk for fuzzy model is presented in the fig. 2.

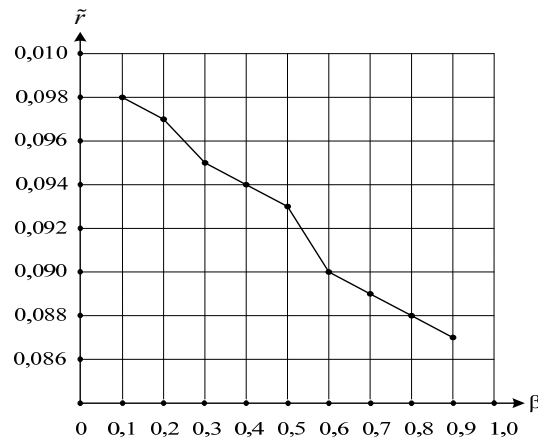


Fig. 2. Dependence “optimal profitability versus risk for fuzzy portfolio”

From this figure it follows that with risk value increase the profitability of optimal fuzzy portfolio drops. Compare these results with Markowitz model (fig. 1).

Dependences of expected profitability on degree of the portfolio risk, received by the above specified methods, are practically opposite. The reason of such result is the different understanding of a portfolio risk. In the fuzzy-set method the risk is understood as a situation when expected profitability of a portfolio falls below the critical level  $r^*$  set by an investor, so with decrease of expected profitability risk of portfolio investments to be less than the critical value, increases.

In Markowitz model the risk is considered as the degree of expected profitability variability of a portfolio, in both cases of smaller and greater profitability that contradicts the common sense. The various understanding of portfolio risk level is also the reason of difference of a portfolio structure, received by different methods.

The structures of an optimum portfolio which are obtained by both methods for the same risk levels are also quite different.

**New fuzzy portfolio optimization model with constraint on volatility**

In this problem portfolio volatility was calculated as difference between maximal and minimal profitability for all the shares. In order to implement this approach the data of all shares prices in portfolio in the period since 01.02.2018 to 02.08. 2018 were taken and for all shares the mean profitability, low and upper bounds and volatility were calculated. The obtained results are presented in the table 4.

**Table 4.** Shares profitability and volatility

N	Company	$\tilde{r}$ , %	$r_{\min}$	$r_{\max}$	$\Delta$
1	APPLE INC	0,0373	-1,0950	0,9000	1,9550
2	CISCO SYS INC	0,3982	-1,1214	1,0653	2,1867
3	INTEL CORP	0,1865	-1,5118	1,4362	2,9481
4	MICROSOFT CORP	0,2428	-0,8635	0,7402	1,6037
5	VISA INC	0,1969	-1,0242	0,7914	1,8156



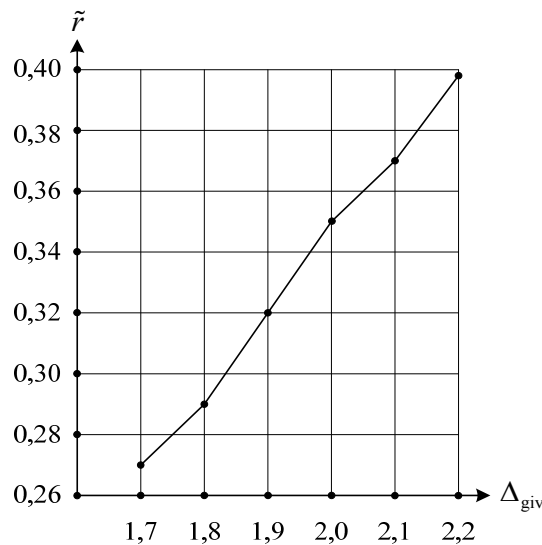
From analysis of the results in the table 4 it follows that the greatest mean profitability have shares of CISCO SYS INC, and the least volatility is for shares of MICROSOFT CORP.

After solution of the corresponding LP-problems optimal portfolio profitability in dependence of volatility was determined which is presented in the table 5.

**Table 5.** Dependence of mean portfolio profitability versus volatility

N	$\Delta_{giv}$	Portfolio volatility	Shares				
			APPLE INC	CISCO SYS INC	INTEL CORP	MICROSOFT CORP	VISA INC
1	1,7	0,269	0,000	0,165	0,000	0,835	0,000
2	1,8	0,295	0,000	0,337	0,000	0,663	0,000
3	1,9	0,322	0,000	0,508	0,000	0,492	0,000
4	2,0	0,349	0,000	0,680	0,000	0,320	0,000
5	2,1	0,376	0,000	0,851	0,000	0,149	0,000
6	2,2	0,3982	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000

Using these results the chart of portfolio profitability for optimal portfolio is shown in the fig. 3.



*Fig. 3.* Dependence of profitability versus volatility for optimal portfolio

From this chart it follows that with increase of volatility the mean profitability of fuzzy portfolio also grows. As we see this dependence well matches to Markowitz portfolio model.

## THE DUAL PORTFOLIO OPTIMIZATION PROBLEM

### Fuzzy portfolio optimization

Now consider the portfolio optimization problem dual to the problem (7)–(11) [7].

To minimize  $\beta(x)$ ; under conditions

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i \geq r^* ;$$

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1, x_i \geq 0 ,$$

where expression for  $\beta(x)$  is given by (3)

### Optimality Conditions for Dual Fuzzy Portfolio Problem

As it was proved in [8] function  $\beta(x)$  is convex therefore the dual portfolio problem (14)–(16) is a convex programming problem. Taking into account that constraints (16) are linear compose Lagrangian function:

$$L(x, \lambda, \mu) = \beta(x) + \lambda(r^* - \sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i) + \mu \left( \sum_{i=1}^N x_i - 1 \right).$$

The optimality conditions by Kuhn–Tucker are such:

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{\partial \beta(x)}{\partial x_i} - \lambda \bar{r}_i + \mu \geq 0, \quad 1 \leq i \leq N ;$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = -\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i + r^* \leq 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \mu} = \sum_{i=1}^N x_i - 1 = 0,$$

and conditions of complementary slackness

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} x_i = 0, \quad 1 \leq i \leq N, \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} \lambda = \lambda \left( -\sum_{i=1}^N x_i \bar{r}_i + r^* \right) = 0, \quad x_i \geq 0, \quad \lambda \geq 0,$$

where  $\lambda \geq 0$  and  $\mu$  are indefinite Lagrange multipliers.

This problem may be solved by standard methods of convex programming, for example method of feasible directions or method of penalty functions.

## THE APPLICATION OF FGMDH FOR STOCK PRICES FORECASTING IN PORTFOLIO OPTIMIZATION PROBLEM

Consider the results of experimental investigations of the developed models and methods of fuzzy portfolio optimization. The profitability of leading companies at NYSE in the period from 03.09.2013 to 17.01.2014 were used as the input data in experimental investigations. The companies included: Canon Inc. (CAJ), McDonald's Corporation (MCD), PepsiCo, Inc. (PEP), The Procter & Gamble Company (PG), SAP AG (SAP).

For forecasting it was suggested to use fuzzy GMDH method with triangular membership functions, linear partial descriptions, training sample of 70%, forecasting for 1 step.

The fuzzy GMDH allows to construct forecasting model using experimental data automatically without participation of an expert. Besides, it may work under uncertainty conditions with fuzzy input data or data given as intervals [9].

The next profitability values real and forecasted by fuzzy GMDH on 17.01.2014 were obtained (table 6):

**Table 6.** The profitability of shares on date 17.01.2014 (real and forecasted), %

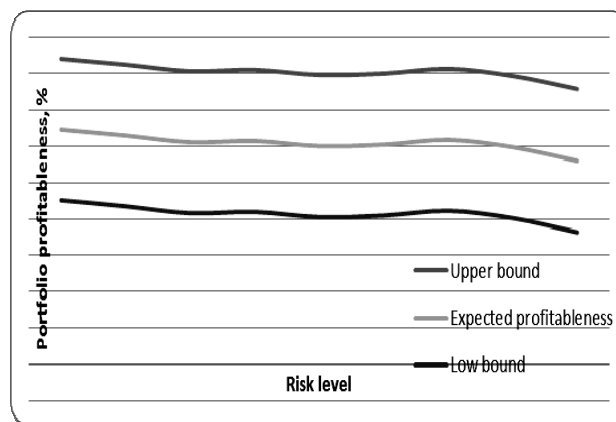
Companies	Profitability				MSE test sample	MAPE test sample
	Real value	Low bound	Forecasted value	Upper bound		
CAJ	-1,270	-1,484	-1,246	-1,008	2,2068	0,0295
MCD	-0,105	-0,347	-0,118	0,111	2,5943	0,0091
PEP	0,206	0,001	0,242	0,483	3,0179	0,0177
PG	0,162	0,041	0,170	0,299	1,6251	0,0197
SAP	0,843	0,675	0,867	1,059	2,3065	0,0164

Thus, as the result of application of FGMDH the shares profitability values were forecasted to the end of 20-th week (17.01.2014).

Let the critical profitability level be 0,7%. Varying the risk level we obtain the following results at the end of 20-th week (17.01.2014) for triangular MF. The results are presented in the table 7 and the dependence “optimal profitability versus risk” is shown in the fig. 4.

**Table 7.** Parameters of the optimal portfolio with critical level  $r^* = 0,7\%$

Low bound	Expected profitability	Upper bound	Risk level
0,55133	0,74591	0,94049	0,2
0,53462	0,72954	0,92446	0,25
0,51544	0,71084	0,90624	0,3
0,51894	0,71431	0,90968	0,35
0,5045	0,70018	0,89587	0,4
0,50877	0,70425	0,89973	0,45
0,522	0,71731	0,91262	0,5
0,50197	0,69752	0,89308	0,55
0,46358	0,66014	0,8567	0,6



*Fig. 4.* Dependence of the expected portfolio profitability versus risk level for triangular MF

As one can see in the fig. 4, the dependence profitability - risk has descending type, the greater is the risk the lesser is profitability which is opposite to classical probabilistic method. When the expected profitability decreases, the risk grows.

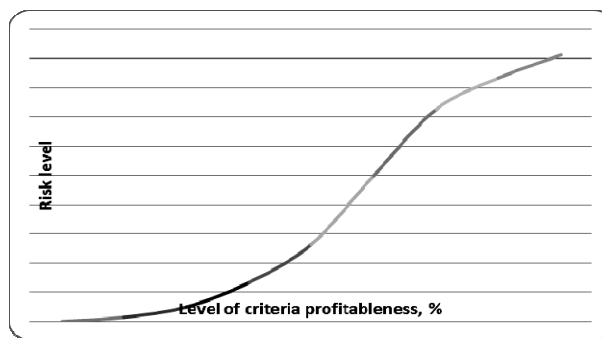
The profitability of the real portfolio is 0,7056%. This value falls in calculated corridor of profitability for optimal portfolio [0,58944, 0,78264, 0,97584] built with application of forecasting, indicating the high accuracy of the forecast (see table 7).

Let's consider the results obtained by solving the dual problem using triangular MF. In this case, the investor sets the rate of return and the problem is to minimize the risk.

The optimal portfolio is presented in table 8 and the dependence "critical level of return- risk" is shown in the fig. 5.

**Table 8.** Parameters of the optimal portfolio (dual task)

Low bound	Expected profitability	Upper bound	Risk level	Critical rate of return
0,58944	0,78264	0,97584	0,00025	0,6
0,59846	0,79141	0,98437	0,01468	0,65
0,61478	0,80735	0,99991	0,04973	0,7
0,6229	0,81531	1,00772	0,13347	0,75
0,63606	0,82822	1,02037	0,26399	0,8
0,64945	0,84181	1,03417	0,49937	0,85
0,63712	0,82933	1,02153	0,72631	0,86
0,63382	0,82612	1,01843	0,8333	0,87
0,62559	0,81805	1,01052	0,91214	0,88



*Fig. 5.* Dependence of the risk level on a given critical return  $r^*$

From these results one can see that the curve "dependence risk – given critical level of profitability" has the ascending character, because with the growth of the critical value of profitability  $r^*$  the probability that the expected profitability would be lower than a given critical value increases.

## CONCLUSION

The problem of optimization of the investment portfolio under uncertainty is considered in this paper. The fuzzy-set approach for solving the direct and dual portfolio optimization problems was suggested and explored. The modified direct portfolio problem with constraint on volatility was suggested and investigated. The results of solving the problems were presented. The optimal portfolios for the five assets at NYSE stock market were constructed and analyzed.

The problem of stock prices forecasting for portfolio optimization was also investigated. Inductive modelling method fuzzy GMDH was applied for stocks prices forecasting at NYSE stock market in the problem of fuzzy portfolio optimization. The application of fuzzy GMDH enables to decrease risk of the wrong decisions concerning portfolio content.

After analysis of experiments it was detected that the dependence “profitableness – risk” in the basic fuzzy model has descending type, the greater risk the lesser is profitableness that is opposite to classical probabilistic Markowitz model. In the modified fuzzy portfolio problem the dependence “profitable volatility” has ascending type like Markowitz model.

The dependence “risk versus given critical level of return” has ascending type, because with the growth of the critical level of profitability the probability that the expected profitability appears to be lower than a given critical value increases.

As the main result of this research the fundamentals of theory of fuzzy portfolio optimization under uncertainty have been developed free from drawbacks of the classic portfolio theory.

## REFERENCES

1. M. Zgurovsky and Yu. Zaychenko, *Fundamentals of Computational Intelligence: System Approach*. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2016.
2. Yu. P. Zaychenko and Maliheh Esfandiyarifard, “Analysis and comparison results of invest portfolio optimization using Markowitz model and fuzzy sets method [rus]”, in *XIII-th International Conference KDS-2007*. SOFIA, vol. 1, pp. 278–286, 2007.
3. Yu. P. Zaychenko and Maliheh Esfandiyarifard, “Analysis of invest portfolio for different membership functions”, *System research and information technologies*, no. 2, pp. 59–76, 2008.
4. A.O. Nedosekin, “System of portfolio optimization of Siemens services [rus]”, *Banking technologies*, no. 5, 2003. Available: <http://www.finansy.ru/publ/fin/004.htm>
5. A.O. Nedosekin, *Corporation business portfolio optimization [rus]*. Available: [http://sedok.narod.ru/s\\_files/2003/Art\\_070303.doc](http://sedok.narod.ru/s_files/2003/Art_070303.doc)
6. L.A. Zadeh, “Fuzzy sets”, *Information and Control*, vol.8, no. 3, pp. 338–353, 1965.
7. Yu. Zaychenko, I. Sydoruk, “Direct and dual problem of investment portfolio optimization under uncertainty”, *International Journal “Information Technologies&Knowledge”*, vol. 8, no. 3, pp. 225–242, 2014.
8. Yu. Zaychenko, Esfandiyarifard Maliheh, “Optimization of the investment portfolio in the conditions of uncertainty”, *International Journal “Information Technologies and Knowledge”*, vol. 2, no. 3, pp. 225–233, 2008.
9. Yu. Zaychenko, “The Fuzzy Group Method of Data Handling and Its Application for Economical Processes Forecasting”, *Scientific Inquiry*, vol. 7, no. 1, pp. 83–98, 2006.

Received 02.07.2020

## INFORMATION ON THE ARTICLE

**Yu. P. Zaychenko**, ORCID: 0000-0001-9662-3269, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: zaychenkoyuri@ukr.net.

**H.Yu. Zaychenko**, ORCID: 0000-0002-4546-0428, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: syncmaster@bigmir.net.

**ПРОБЛЕМА НЕЧІТКОЇ ПОРТФЕЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ /** О.Ю. Зайченко, Ю.П. Зайченко

**Анотація.** Розглянуто проблему побудови оптимального портфеля з цінних паперів в умовах невизначеності, а також пряму та двоїсту задачі портфельної оптимізації. Запропоновано нову постановку задачі нечіткої оптимізації портфеля за обмежень на волатильність. У двоїстій задачі визначається структура портфеля, яка забезпечує мінімум ризику за обмежень на заданий рівень доходності. Для підвищення обґрунтованості рішень щодо структури портфеля та зменшення ризику запропоновано використання прогнозування цін акцій в моделі портфеля. Дані за цінами акцій прогнозуються з використанням нечіткого МГУА. Проведено експериментальні дослідження запропонованих нечітких моделей та порівняння з моделлю Марковитца на ринку цінних паперів. У результаті роботи створено основи теорії нечіткої портфельної оптимізації на базі теорії нечітких множин та методу прогнозування.

**Ключові слова:** нечіткий портфель, модифікована модель нечіткої портфельної оптимізації, прогнозування цін акцій, нечіткий МГУА.

**ПРОБЛЕМА НЕЧЕТКОЙ ПОРТФЕЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА /** Е.Ю. Зайченко, Ю.П. Зайченко

**Аннотация.** Рассмотрены проблема построения оптимального портфеля из ценных бумаг в условиях неопределенности, а также прямая и двойственная задачи нечеткой портфельной оптимизации. Предложена новая постановка задачи нечеткой оптимизации портфеля с ограничением на волатильность портфеля. В двойственной задаче определяется структура портфеля, которая обеспечивает минимум риска при заданном уровне доходности. Для обеспечения обоснованности принимаемых решений по структуре портфеля и уменьшения риска предложено использовать прогнозирование цен акций в модели портфеля. Данные по ценам акций для системы портфельной оптимизации прогнозируются с использованием нечеткого МГУА. Проведены экспериментальные исследования предложенных нечетких моделей и сравнение с моделью Марковитца на рынке ценных бумаг. В результате работы построены основы теории нечеткой портфельной оптимизации на основе теории нечетких множеств и эффективного метода прогнозирования

**Ключевые слова:** нечеткий портфель, модифицированная модель нечеткой портфельной оптимизации, прогнозирование цен акций, нечеткий МГУА.

## НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

С.С. ФЕДИН, Н.А. ЗУБРЕЦКАЯ

**Аннотация.** На основе нейросетевого моделирования и алгоритма симплекс-поиска предложена методика установления оптимальных значений параметров технологических процессов при решении обратной задачи многофакторной регрессии. Практическое использование методики реализовано на примере технологического процесса контактной точечной сварки и направлено на оптимизацию конструктивного параметра — диаметра ядра сварных соединений для уменьшения уровня их дефектности при серийном изготовлении.

**Ключевые слова:** модель нейронной сети, оптимизация, симплекс-поиск, точечные сварные соединения, диаметр ядра, уровень дефектности.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из наиболее широко используемых способов сварочного производства изделий машиностроения является контактная точечная сварка (КТС). Так, например, в автомобилестроении около 70 % объема сварочных работ выполняется этим способом [1, 2]. В технологии КТС ядро расплавленного металла свариваемых деталей соединения характеризуется конструктивными параметрами, к которым относят диаметр ядра  $d$ , величину проплавления  $h$  и величину вмятины  $g$ . Эти параметры оказывают наиболее значимое влияние на прочностные свойства точечного сварного соединения [3–6]. Поэтому основной задачей технологии КТС является получение оптимальных значений конструктивных параметров (геометрических характеристик), которые должны находиться в пределах технологических допусков [7]. При этом практический опыт показывает, что рассеяние геометрических характеристик неразъемных соединений зависит от технологических режимов КТС и может в ряде случаев описываться различными прогнозными моделями [3].

Известно, что результативность прогнозной или регрессионной модели заключается в нахождении параметра качества изделия (соединения) по новому набору параметров технологического процесса, когда на вход модели подается массив значений независимых переменных, а на выходе оценивается значение зависимой переменной — отклика [8]. В условиях большого разброса значений характеристик неразъемных соединений актуальным является решение обратной задачи — определения совокупности оптимальных значений независимых переменных по известным значениям отклика. Подобные оптимизационные задачи возникают, например, при массовом или серийном производстве точечных сварных соединений, где переменная

отклика может быть представлена в виде одного или нескольких конструктивных параметров соединения, а независимыми переменными являются показатели технологического процесса, т.е. совокупность параметров технологических режимов КТС [3].

Одним из вариантов решения обратной задачи регрессии является совместное применение нейросетевого моделирования и симплекс-метода, позволяющего минимизировать (максимизировать) произвольную функцию за конечное число итераций [9]. Следует отметить, что при отсутствии ограничений, за исключением требования непрерывности целевой функции, преимуществом симплекс-метода является относительно малое машинное время получения результата оптимизации при любом числе независимых переменных [10, 11]. Сущность процесса оптимизации при совместном использовании нейросетевого моделирования и симплекс-метода заключается в том, что для каждого выбранного множества независимых переменных (предикторов) прогноз нейросетевой модели сравнивается с желаемым значением отклика. Эта процедура повторяется до тех пор, пока не будет найдено множество значений предикторов, на котором оптимизационная модель позволяет получить равное или максимально близкое к желаемому значение переменной отклика.

Таким образом, научный интерес представляет процедура оптимизации качества неразъемных соединений в зависимости от параметров технологического процесса КТС, для реализации которой требуется решить следующие взаимосвязанные задачи математического и компьютерного моделирования:

- установить регрессионную зависимость между параметрами технологического процесса (предикторами) и контролируемым параметром качества соединений  $d$  (откликом) с использованием нейросетевых моделей;
- определить оптимальные значения предикторов при заданной целевой величине отклика на основе симплекс-метода.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Процесс моделирования и оптимизации технологических режимов КТС включает создание вероятностных, нейросетевых и оптимизационных моделей. Эти модели можно получить в результате проведения серии вычислительных экспериментов с использованием методов и алгоритмов:

- статистической оценки уровня дефектности сварных точечных соединений;
- нейросетевого моделирования регрессионной зависимости между предикторами  $X_1 — X_8$  и откликом  $Y$  — диаметром ядра  $d$ ;
- симплекс-поиска оптимальных значений предикторов по целевому значению отклика  $d$ .

Пусть задана обучающая выборка данных  $\langle X_i, X_j^F \rangle$ , где  $X_i$  — технологические режимы КТС,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $Y_j^F$  — конструктивные параметры точечных сварных соединений,  $j = 1, 2, \dots, M$ . Определим результат обучения в виде ансамбля моделей нейронных сетей, предназначенных для полу-



чения прогнозных значений  $Y^P$  многофакторной регрессии  $Y^F = R(X_i)$ . Задача заключается в определении новых (оптимальных) значений  $X_i$  для заданных целевых значений  $Y^F$  при условии  $\Delta \rightarrow \min$ ,  $\Delta = Y^F - Y^P$ .

Поскольку в задаче нейросетевой регрессии имеется несколько входов  $X_i$  и один выход (отклик)  $Y_j^F \equiv d$ , то многослойный персептрон, обученный по алгоритму обратного распространения ошибки, для случая одного отклика можно формализовать на основе вложенной сигмоидной функции преобразования в виде

$$F(x, w) = \varphi \left( \sum_p w_{pr} \varphi \left( \sum_l w_{lp} \varphi \left( \dots \varphi \left( \sum_i w_{ij} x_i \right) \right) \right) \right), \quad (1)$$

где  $w_{pr}$  — синаптический весовой коэффициент связи между нейроном  $p$ -го последнего скрытого слоя и единственным выходным нейроном  $r$  и т.д. для всех остальных синаптических весовых коэффициентов;  $x_i$  —  $i$ -й элемент входного вектора  $X$ .

Вектор  $w$  содержит полное множество синаптических весов, упорядоченное сначала по слоям, затем по нейронам каждого отдельного слоя и по синапсам отдельных нейронов. В модели (1) активационные функции  $\varphi^{(k)}(\cdot)$  представлены в нейросетевом функционально-логическом базисе с множеством коэффициентов  $w$ , которые являются настраиваемыми (обучаемыми) в процессе установления регрессионной зависимости между  $X_i$  и  $d$ .

При этом следует отметить, что нейросетевое непараметрическое моделирование регрессионной зависимости не позволяет представить ее в классическом формульном виде, поскольку уравнение регрессии, полученное в нейросетевом логическом базисе, формализуется неявно в виде соответствующих матриц весовых коэффициентов межнейронных связей  $w$ .

По сравнению с классической регрессией нейросетевое моделирование многофакторной зависимости на основе обучающей выборки данных типа  $\langle X_i, X_j^F \rangle$  позволяет адаптироваться к свойствам и характеристикам нелинейных входных сигналов при условии частичной мультиколлинеарности предикторов  $X_i$  для получения регрессионных моделей, инвариантных к форме представления входной информации с использованием комплексирования нейронных сетей.

Учитывая тот факт, что обучающим показателем комплекса нейросетевых моделей является один отклик — диаметр ядра  $d$ , то решение обратной задачи многофакторной регрессии для установления оптимальных значений параметров технологических процессов  $X_i$  возможно с использованием метода симплекс-поиска на основе одной целевой функции эффективности [10].

## ЦЕЛЬ, ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является создание моделей нейронных сетей для симплекс-поиска оптимальных параметров технологического процесса КТС и обеспечения качества неразъемных сварных соединений.

Объектом исследования является процесс нейросетевого моделирования и оптимизации технологических режимов КТС соединений деталей из листов сплава Д16АТ.

Предметом исследования являются вероятностные, нейросетевые и оптимизационные модели, полученные на основе серии повторных вычислительных экспериментов с использованием методов и алгоритмов системы анализа данных STATISTICA.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ результатов экспериментальных исследований В.П. Бурмистрова, В.Н. Волченко, С.Н. Козловского показал, что в производственных условиях сварные соединения характеризуются большим разбросом характеристик, что обуславливает необходимость использования методов статистического контроля и оптимизации качества соединений по параметрам технологического процесса КТС [3–5]. Решение задачи оптимизации конструктивных параметров точечных сварных соединений эмпирическими методами рассмотрено в работах Л. П. Андреевой, В.В. Овчинникова, В.И. Рязанцева [12–14]. В частности, в работе [12] отмечено, что для основного конструктивного параметра диаметра ядра  $d$ , определяющего качество соединений, существуют оптимальные режимы сварки. В технической литературе имеются сведения о том, что зависимость между параметрами технологического процесса КТС на входе и параметром  $d$  точечного сварного соединения на выходе имеет сложный нелинейный характер [2, 4, 6].

Для управления нелинейными процессами и оптимизации показателей их качества широко используются теоретическая и прикладная методологии решения прогнозных и экстремальных задач на основе аналитических или численных методов [8, 15]. Однако современные требования к оперативности обработки и достоверности анализа данных о показателях технологического процесса предопределяют целесообразность использования адаптивных прогнозных и оптимизационных моделей [16, 17]. Так, например, в работе М. С. Слободяна значительное внимание уделено методам оптимизации сварочных процессов на основе математического моделирования технологических режимов КТС и компьютерной симуляции формирования параметров качества соединения [17]. При этом не полностью решенной является комплексная научная проблема моделирования нелинейных зависимостей с использованием адаптивных нейронных сетей и компьютерного симуляционного прогнозирования на основе решения обратной задачи регрессии в пространстве независимых переменных [10, 16].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом деталей неразъемных точечных сварных соединений является сплав Д16АТ, поставляемый в виде листового проката и имеющий одни из наилучших конструкционных показателей среди других видов проката из алюминиевых сплавов [3, 18]. Листы сплава Д16АТ используются в качестве конструкционного материала и обшивки в авиастроении, поскольку обладают легкостью и высокой твердостью [18]. Из деталей сплава Д16АТ

способом КТС в большинстве случаев получают многоточечные неразъемные соединения, которые выполняют в виде одного (рис. 1, а) или нескольких (рис. 1, б) рядов сварных точек, расположенных вдоль нахлестки деталей [5].

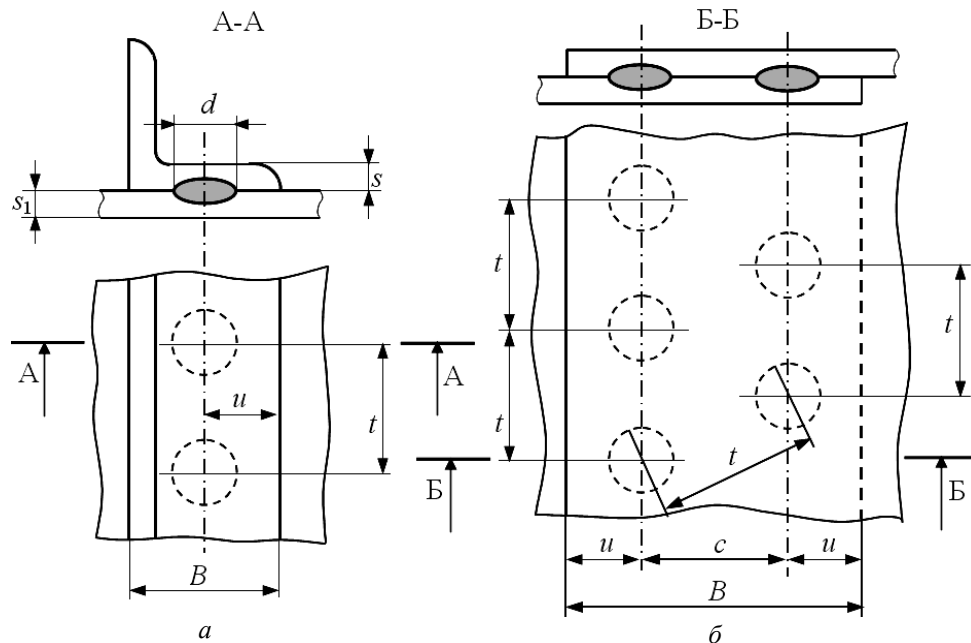


Рис. 1. Схема конструктивных элементов соединений при точечной сварке однорядным и двухрядным швом:  $d$  — диаметр ядра;  $s, s_1$  — толщина деталей;  $B$  — величина нахлестки;  $t$  — шаг сварных точек;  $u$  — расстояние от оси шва до края нахлестки;  $c$  — расстояние между осями швов

В закаленном и естественно состаренном состоянии листы имеют наибольшую прочность в пределах до  $80^\circ\text{C}$ . Однако при более высоких температурах механические показатели изделий из сплава Д16АТ ухудшаются. Поэтому и прокат из этого сплава используется после закалки и искусственного старения. Это негативно влияет на прочностные свойства материала, однако предотвращает дальнейшую его деградацию в пределах до  $120^\circ\text{C}$  [18].

По прочностным характеристикам сварные соединения из листов сплава Д16АТ относятся к группе А (табл. 1) [7].

Минимально допускаемые значения  $d$  определяются влиянием целого ряда факторов, к которым относят прочность сварных соединений и стабильность ее значений, устойчивость процесса КТС против образования выплесков, непроваров и др. [5]. Максимальные размеры ядра ограничивают из-за возможности появления различных дефектов, снижения стойкости электродов, устанавливая верхние пределы на 15...25 % больше минимально допустимых (при толщине деталей  $s \geq 0,5$  мм) [6]. При  $s \geq 0,5$  мм минимальный диаметр литого ядра  $d$  для соединений группы А, учитывающий уменьшение отношения  $d/s$  с ростом толщины деталей, наиболее точно можно определить по эмпирической формуле [5, 6]

$$d = 4s^{2/3} . \quad (2)$$

**Таблица 1.** Допусковые значения параметров соединений группы А, полученных способом КТС, мм [7]

$s = s_i$	$d$ , не менее	Величина нахлестки $B$ , не менее		$t$ , не менее	$c$ , не менее	
		Стали, сплавы на железоникелевой и никелевой основах, титановые сплавы	Алюминиевые, магниевые, медные сплавы			
0,3	2,5	6	10	8	9,0	
0,3...0,4	2,7	7		10	10	12,0
0,4...0,6	3,0	8		12	11	13,0
0,6...0,7	3,3	9	14	13	15,5	
0,7...0,8	3,5	10		15	18,0	
0,8...1,0	4,0	11	16	17	20,5	
1,0...1,3	5,0	13	18	20	24,0	
1,3...1,6	6,0	14	19	22	26,0	
1,6...1,8	6,5	15	20	25	30,0	
1,8...2,2	7,0	17	22	30	36,0	
2,2...2,7	8,0	19	26	35	42,0	
2,7...3,2	9,0	21	28	40	48,0	
3,2...3,7	10,5	24	32	45	54,0	
3,7...4,2	12,0	28	36	50	60,0	
4,2...4,7	13,0	31	40	55	66,0	
4,7...5,2	14,0	34	46	60	72,0	
5,2...5,7	15,0	38	50	65	78,0	
5,7...6,0	16,0	42				

Как показывает анализ статистических данных, разброс диаметра ядра при серийном изготовлении точечных сварных соединений из листов сплава Д16АТ зависит от выбора технологических режимов (табл. 2) и соответствует закону нормального распределения с определенными значениями коэффициента вариации, полученными на основе результатов выборочного контроля качества соединений (табл. 3) [3].

Анализ данных (табл. 1–3) показывает, что для обеспечения качества точечных сварных соединений оптимизационные модели целесообразно получать только в определенном диапазоне толщины деталей и соответствующем ему диапазоне значений диаметра ядра. При этом из совокупности выборок (табл. 2), характеризующихся различными вариантами технологических режимов, чаще всего встречается значение толщины  $s = 1,0$ . Поэтому в качестве исходных данных для создания оптимизационных моделей были отобраны выборки 2, 4, 5, 6, 11 (табл. 2) с соответствующими им средними значениями  $\bar{x}_d$  и коэффициентами вариации  $C_V$  (табл. 3).

**Таблица 2.** Технологические режимы изготовления соединений

Номер выборки	Толщина материала, мм		Радиус сферы электродов, мм		Продолжительность импульса тока $t_{св}$ , с	Амплитуда импульса тока $I_{св}$ , кА	Усилие сжатия электродов, кН	
	верхнего $s$	нижнего $s_1$	верхнего $R_{Э1}$	нижнего $R_{Э2}$			сварочное $F_{св}$	ковочное $F_{К}$
1	0,8	0,8	50	50	0,04	32	3...4	3,5...4,2
2	1,0	0,8	75	50	0,04	32	3...4	3,5...4,2
3	0,8	1,0	50	75	0,04	32	5	3,5
4	1,0	2,0	75	100	0,06	40	4...5	5...6
5	1,0	1,2	75	100	0,06	40	4	5...6
6	1,0	1,2	75...100	75	0,06	40	4...5	4...5
7	1,2	1,2	100	75	0,06	45	5...6	7,0
8	1,2	1,2	100	75	0,06	45	6	8,0
9	1,5	1,2	100	75	0,06	47	6	8,0
10	1,2	2,0	75	100	0,06	47	6	8,0
11	1,0	1,2	75	75...100	0,08	40	5	6,0
12	1,5	1,5	100	100	0,08	47	5	9,0
13	1,8	1,5	100	75	0,06	47	5...6	9,0
14	1,8	1,2	100	75	0,06	40	5...6	8,0

**Таблица 3.** Средние арифметические значения и коэффициенты вариации  $d$

Номер и объем выборки, штук	$\bar{x}_d$ , мм	$C_V$ , %
1 (500)	4,13	5,50
2 (570)	4,37	6,50
3 (560)	4,20	6,20
4 (560)	4,35	6,21
5 (560)	4,59	6,50
6 (580)	4,69	6,20
7 (550)	5,55	4,30
8 (560)	5,90	4,10
9 (590)	5,40	5,20
10 (500)	5,29	3,90
11 (540)	4,64	6,49
12 (550)	6,35	3,10
13 (550)	6,29	2,62
14 (550)	5,40	4,30

Учитывая зависимость (2) и условие расчета максимального размера ядра, получим диапазон значений диаметра ядра (4,0...5,0) мм, что соответствует допуску по ГОСТ 15878–79 [7]. Для отобранных выборок (табл. 4) определим значения величины стандартного отклонения  $\sigma$  (табл. 5)

$$\sigma = \frac{\bar{x}_d C_V}{100}. \quad (3)$$

**Таблица 4.** Технологические режимы изготовления соединений для выборок 2, 4, 5, 6, 11

Номер выборки	Толщина материала, мм		Радиус сферы электродов, мм		Продолжительность импульса тока X5, с	Амплитуда импульса тока X6, кА	Усилия сжатия электродов, кН	
	верхнего X1	нижнего X2	верхнего X3	нижнего X4			сварочное X7	ковочное X8
2	1,0	0,8	75	50	0,04	32	3,00	4,20
4	1,0	2,0	75	100	0,06	40	5,00	5,00
5	1,0	1,2	75	100	0,06	40	4,00	6,00
6	1,0	1,2	75	75	0,06	40	4,00	4,00
11	1,0	1,2	75	75	0,08	40	5,00	6,00

**Таблица 5.** Средние арифметические значения и стандартные отклонения  $d$

Номер и объем выборки, штук	$\bar{x}_d \equiv Y$ , мм	$\sigma_d$ , мм
2 (570)	4,37	0,28
4 (560)	4,35	0,27
5 (560)	4,59	0,30
6 (580)	4,69	0,29
11 (540)	4,64	0,30

Таким образом, значения технологических режимов  $X_i$  (табл. 4) и статистических параметров  $\bar{x}_d$  и  $\sigma_d$  (табл. 5) являются исходными данными для проведения вычислительного эксперимента.

### ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На первом этапе вычислительного эксперимента рассчитывали уровень дефектности для данных, полученных при серийном изготовлении точечных сварных соединений с учетом того, что распределение значений диаметра ядра соединений соответствует нормальному закону. Решение этой задачи для допуска  $d = (4,0 \dots 5,0)$  мм и параметров (табл. 5) осуществляли с использованием инструмента «Вероятностный калькулятор» системы STATISTICA 6.1. Результат оценки уровня дефектности точечных сварных соединений из листов сплава Д16АТ приведен в табл. 6.

**Таблица 6.** Оценка производственного уровня дефектности соединений из листов сплава Д16АТ

Уровень дефектности, %	$\bar{x}_d \equiv Y$ , мм	$\sigma_d$ , мм
$(0,093179+0,012224) \cdot 100 = 10,54$	4,37	0,28
$(0,097437+0,008033) \cdot 100 = 10,55$	4,35	0,27
$(0,024611+0,085865) \cdot 100 = 11,05$	4,59	0,30
$(0,008673+0,142543) \cdot 100 = 15,12$	4,69	0,29
$(0,016449+0,115070) \cdot 100 = 13,15$	4,64	0,30

Второй этап вычислительного эксперимента заключался в решении прямой задачи регрессии на основе моделей нейронных сетей типа многослойный персептрон. При этом для исходной обучающей выборки, включающей пять примеров (табл. 7), с использованием инструмента «Мастер решений» модуля «Нейронные сети» системы STATISTICA 6.1 определяли диапазон нейронов скрытого слоя персептрона от 1 до 11 (рис. 2).

Таблица 7. Исходная обучающая выборка

Номер примера	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	Y
1	1,0	0,8	75	50	0,04	32	3,00	4,20	4,37
2	1,0	2,0	75	100	0,06	40	5,00	5,00	4,35
3	1,0	1,2	75	100	0,06	40	4,00	6,00	4,59
4	1,0	1,2	75	75	0,06	40	4,00	4,00	4,69
5	1,0	1,2	75	75	0,08	40	5,00	6,00	4,64

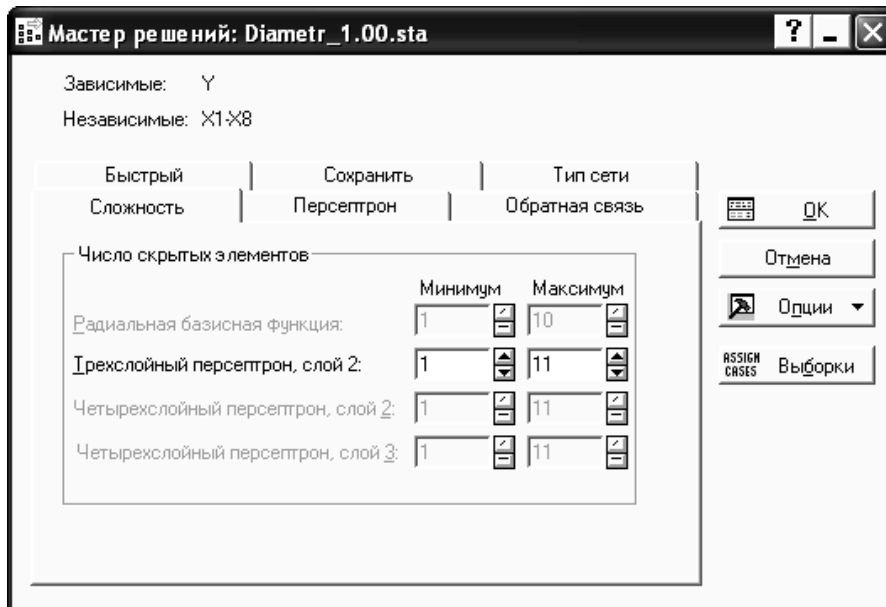


Рис. 2. Диапазон нейронов скрытого слоя персептрона

Для обеспечения достоверности решения задачи регрессии применяли процедуру многократного повторения на входе исходной обучающей выборки малого объема [19]. Кратность повторения обучающих примеров определяли на основе неравенства, являющегося следствием теорем Арнольда – Колмогорова – Хехт-Нильсена [20, 21]:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq W \leq m \left( \frac{N}{n} + 1 \right) (n + m + 1) + m, \quad (4)$$

где  $W$  — общее число весовых коэффициентов нейронной сети (включая  $bias$  — смещение);  $N$  — количество примеров обучающей выборки;  $n, m$  — размерность входного и выходного сигнала соответственно.

Объем выборки для модели персептрона с архитектурой 8-1-1 и минимальным числом весовых коэффициентов  $W = 11$  рассчитывали на основе левой границы неравенства (4), а для модели персептрона с архитектурой 8-11-1 и максимальным числом весовых коэффициентов  $W = 11$  — на основе правой границы неравенства (4). Среднее арифметическое двух этих значений позволило определить кратное пяти количество примеров обучающей выборки  $N = 80$ . Таким образом, для получения обучающей выборки в установленном диапазоне нейронов персептрона (рис. 2) объем исходной выборки повторяли 16 раз.

Обеспечение сходимости результатов нейросетевого моделирования реализовывали способом статистических испытаний моделей нейронных сетей для 10 повторных экспериментов (обучений), обучая в каждом эксперименте 1000 моделей персептронов. При этом в качестве критерия выбора нейросетевой модели использовали параметр наименьшей ошибки обучения с логистическим кодированием выхода в регрессии. После процедуры обучения сохраняли 5 лучших нейросетевых моделей по минимальным значениям ошибки обучения, контрольной и тестовой ошибок (рис. 3, табл. 8).

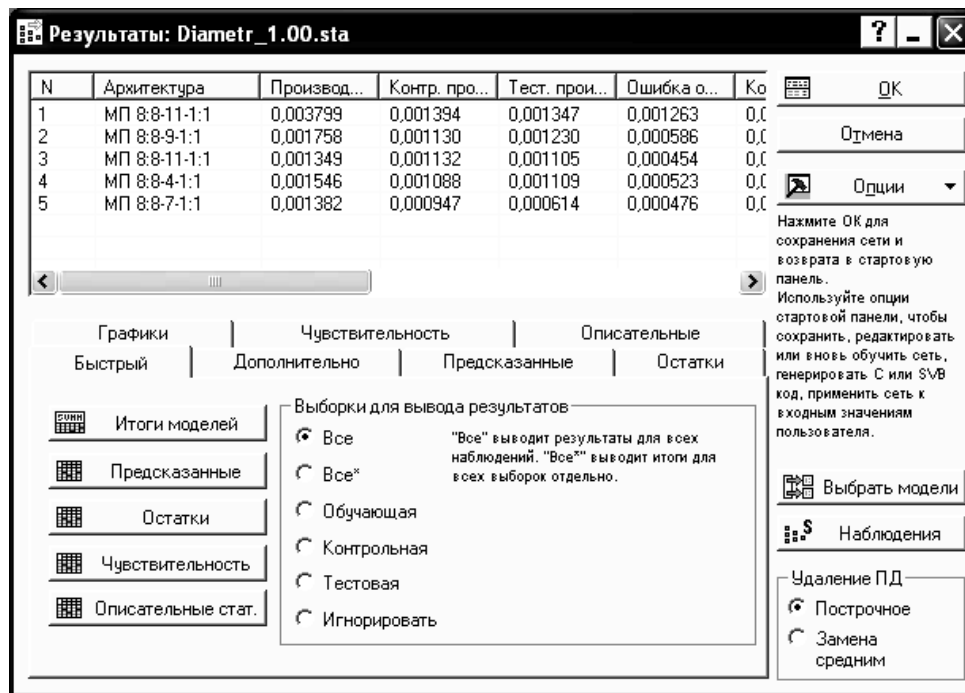


Рис. 3. Пример результата обучения пяти лучших моделей персептронов в модуле «Нейронные сети» системы STATISTICA 6.1 для первого эксперимента

Таблица 8. Результат обучения пяти лучших нейросетей для первого эксперимента

Номер модели	Архитектура нейросети	Ошибка обучения	Контрольная ошибка	Тестовая ошибка
1	8-11-1	0,001263	0,000447	0,000475
2	8-9-1	0,000586	0,000363	0,000431
3	8-11-1	0,000454	0,000350	0,000381
4	8-4-1	0,000523	0,000338	0,000400
5	8-7-1	0,000476	0,000293	0,000212



Из полученных пяти лучших моделей персептронов (табл. 8) выбирали худшую модель 8-11-1 (Y.1) и лучшую модель 8-7-1 (Y.5) по значению статистического критерия дисперсионного отношения (рис. 4).

	Регрессия (1-5) (Diametr_1.00.sta)				
	Y.1	Y.2	Y.3	Y.4	Y.5
Среднее данных	4,528000	4,528000	4,528000	4,528000	4,528000
Ст.откл. данных	0,140911	0,140911	0,140911	0,140911	0,140911
Среднее ошибки	0,000002	0,000006	-0,000019	-0,000032	-0,000030
Ст.откл. ошибки	0,000404	0,000213	0,000174	0,000190	0,000159
Среднее абсолютной ошибки	0,000217	0,000170	0,000132	0,000148	0,000113
<b>Отношение ст.откл.</b>	<b>0,002868</b>	0,001511	0,001236	0,001348	<b>0,001132</b>
Корреляция	0,999996	0,999999	0,999999	0,999999	0,999999

Рис. 4. Статистические критерии, характеризующие адекватность моделей персептронов для первого эксперимента

Продолжительность обучения нейронных сетей для каждого из 10 вычислительных экспериментов составляла от 40 до 60 секунд на аппаратной платформе AMD Athlon II 2 240 (2,81 ГГц, 1,75 ГБ ОЗУ)

Таким образом, в результате 10 вычислительных экспериментов из 10000 созданных моделей по критерию дисперсионного отношения были отобраны 10 худших и 10 лучших моделей персептронов, архитектуры которых приведены в табл. 9.

Таблица 9. Полученные архитектуры моделей персептронов и соответствующие им оценки дисперсионного отношения

Номер эксперимента	Архитектура / Дисперсионное отношение	
	худшие	лучшие
1	8-11-1 / 0,00287	8-7-1 / 0,00113
2	8-3-1 / 0,00328	8-1-1 / 0,00245
3	8-1-1 / 0,00203	8-2-1 / 0,00118
4	8-5-1 / 0,00286	8-7-1 / 0,00024
5	8-7-1 / 0,00228	8-11-1 / 0,00027
6	8-2-1 / 0,00298	8-8-1 / 0,00034
7	8-9-1 / 0,00098	8-10-1 / 0,00056
8	8-5-1 / 0,00204	8-8-1 / 0,00067
9	8-5-1 / 0,00703	8-7-1 / 0,00104
10	8-7-1 / 0,00223	8-4-1 / 0,00054

Анализ полученных архитектур показывает частичное их повторение как в каждой из двух классификационных групп, так и между группами худших и лучших, что свидетельствует о вероятностном характере распределения результатов нейросетевого моделирования и обеспечении их сходности.

Для каждой из отобранных моделей нейронных сетей (табл. 9) получали прогнозные значения отклика, точность которых оценивали по критерию средней относительной ошибки между фактическими  $Y^F$  и прогнозными  $Y^P$  значениями диаметра ядра (табл. 10, 11):

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i^F - Y_i^P|}{Y_i^F}. \quad (5)$$

**Таблица 10.** Прогнозные значения отклика  $Y^F$  и оценки  $MAPE$  для худших нейросетей

$Y^F$ , мм	Модель									
	8-11-1	8-3-1	8-1-1	8-5-1	8-7-1	8-2-1	8-9-1	8-5-1	8-5-1	8-7-1
4,37	4,3701	4,3698	4,3702	4,3699	4,3702	4,3698	4,3699	4,3697	4,3706	4,3701
4,35	4,3502	4,3498	4,3498	4,3498	4,3497	4,3499	4,3500	4,3503	4,3514	4,3499
4,59	4,5899	4,5896	4,5900	4,5905	4,5903	4,5899	4,5902	4,5901	4,5885	4,5902
4,69	4,6898	4,6909	4,6895	4,6899	4,6903	4,6901	4,6899	4,6896	4,6901	4,6899
4,64	4,6403	4,6400	4,6403	4,6394	4,6395	4,6401	4,6400	4,6397	4,6405	4,6399
<b>MAPE</b>	<b>0,0037</b>	<b>0,0075</b>	<b>0,0051</b>	<b>0,0062</b>	<b>0,0069</b>	<b>0,0019</b>	<b>0,0023</b>	<b>0,0063</b>	<b>0,0183</b>	<b>0,0020</b>

**Таблица 11.** Прогнозные значения отклика  $Y^P$  и оценки  $MAPE$  для лучших нейросетей

$Y^F$ , мм	Модель									
	8-7-1	8-1-1	8-2-1	8-7-1	8-11-1	8-8-1	8-10-1	8-8-1	8-7-1	8-4-1
4,37	4,3700	4,3696	4,3698	4,3700	4,3700	4,3699	4,3698	4,3701	4,3700	4,3700
4,35	4,3498	4,3495	4,3498	4,3500	4,3500	4,3499	4,3499	4,3502	4,3499	4,3499
4,59	4,5902	4,5899	4,5899	4,5900	4,5899	4,5899	4,5899	4,5900	4,5901	4,5901
4,69	4,6899	4,6903	4,6902	4,6900	4,6900	4,6900	4,6899	4,6901	4,6899	4,6899
4,64	4,6400	4,6402	4,6401	4,6399	4,6399	4,6399	4,6399	4,6402	4,6399	4,6399
<b>MAPE</b>	<b>0,0021</b>	<b>0,0071</b>	<b>0,0036</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0009</b>	<b>0,0010</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0022</b>	<b>0,0011</b>	<b>0,0012</b>

Анализ данных, приведенных в табл. 9–11, показывает, что для каждой из моделей персептронов меньшие и большие значения оценок дисперсионного отношения соотносятся с меньшими и большими значениями оценок (5), что подтверждает достоверность результатов прогнозирования.

На третьем этапе вычислительного эксперимента осуществляли решение обратной задачи регрессии с использованием инструмента «Оптимизация отклика» системы STATISTICA 6.1 и 20 сохраненных на языке Predictive Model Markup Language (PMML) нейросетевых моделей (табл. 9). При этом целевое значение диаметра ядра задавали равным середине поля допуска  $d = 4,5$  мм и получили график сходимости алгоритма симплекс-поиска, отображающий приближение прогнозов нейросетевых моделей *Vad* и *Best* к целевому значению в зависимости от номера итерации (рис. 5).

Время, затрачиваемое на получение результата сходимости алгоритма симплекс-поиска к целевому значению отклика на аппаратной платформе AMD Athlon II 2 240 (2,81 ГГц, 1,75 ГБ ОЗУ) составило несколько секунд.

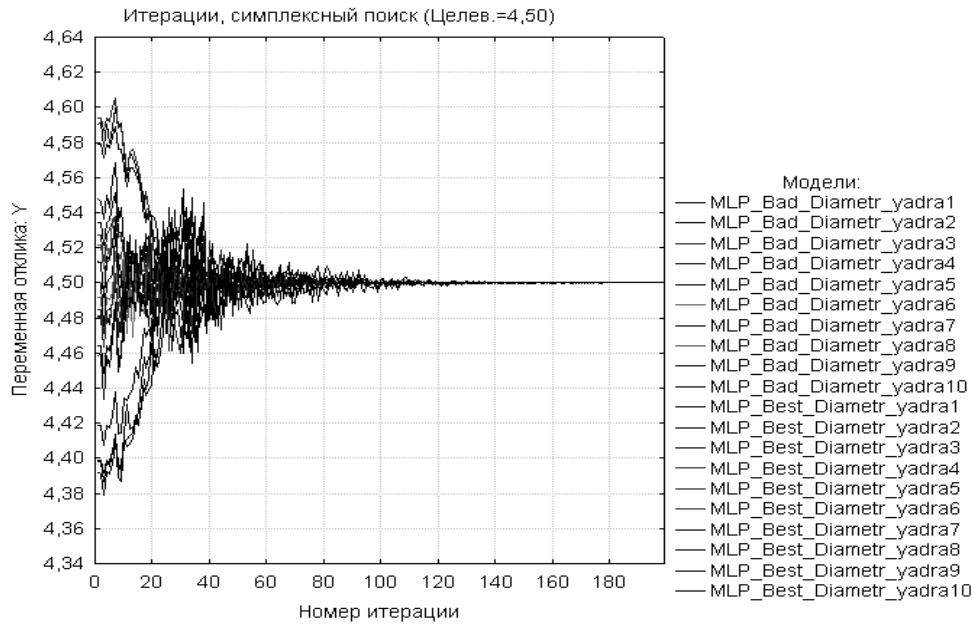


Рис. 5. Сходимость алгоритма симплекс-поиска к целевому значению отклика

### РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате использования алгоритма симплекс-поиска получены значения предикторов, характеризующих оптимальные режимы КТС:  $X1=1,0$ ;  $X2=1,2$ ;  $X3=75$ ;  $X4=85$ ;  $X5=0,06$ ;  $X6=37$ ;  $X7=4$ ;  $X8=5$  (рис. 6).

Результаты , симплексный поиск (Diametr_1.00.sta)										
Имя зависимой: Y										
Целев. = 4,50										
Загр. XML-файлы	Имя модели	X1 Незав.	X2 Незав.	X3 Незав.	X4 Незав.	X5 Незав.	X6 Незав.	X7 Незав.	X8 Незав.	Y Предсказанные
MLP_Bad_Diametr_yadra1	MLP-8:3:1-OP100,CF11b	1,0	1,3	75	81	0,06	38	4	5	4,50
MLP_Bad_Diametr_yadra2	MLP-8:3:1-OP100,CF56b	1,0	1,3	75	81	0,06	38	4	5	4,50
MLP_Bad_Diametr_yadra3	MLP-8:3:1-OP100,CF90b	1,0	1,3	75	81	0,06	38	4	5	4,50
MLP_Bad_Diametr_yadra4	MLP-8:3:1-OP100,CF71b	1,0	1,3	75	81	0,06	38	4	5	4,50
MLP_Bad_Diametr_yadra5	MLP-8:3:1-OP100,CF110b	1,0	1,3	75	81	0,06	38	4	5	4,50
MLP_Bad_Diametr_yadra6	MLP-8:3:1-OP100,CF39b	1,0	1,3	75	81	0,06	38	4	5	4,50
MLP_Bad_Diametr_yadra7	MLP-8:3:1-OP100,CF23b	1,0	1,3	75	85	0,06	37	4	5	4,50
MLP_Bad_Diametr_yadra8	MLP-8:3:1-OP100,CF157b	1,0	1,3	75	86	0,06	37	4	5	4,50
MLP_Bad_Diametr_yadra9	MLP-8:3:1-OP100,CF191b	1,0	1,2	75	89	0,06	37	4	5	4,50
MLP_Bad_Diametr_yadra10	MLP-8:3:1-OP100,CF25b	1,0	1,2	75	89	0,06	37	4	5	4,50
MLP_Best_Diametr_yadra1	MLP-8:3:1-OP100,CF31b	1,0	1,2	75	90	0,06	37	4	5	4,50
MLP_Best_Diametr_yadra2	MLP-8:3:1-OP100,CF90b	1,0	1,2	75	87	0,06	38	4	5	4,50
MLP_Best_Diametr_yadra3	MLP-8:3:1-OP100,CF89b	1,0	1,1	75	86	0,06	38	4	5	4,50
MLP_Best_Diametr_yadra4	MLP-8:3:1-OP100,CF209b	1,0	1,2	75	86	0,06	37	4	5	4,50
MLP_Best_Diametr_yadra5	MLP-8:3:1-OP100,CF145b	1,0	1,2	75	86	0,06	37	5	5	4,50
MLP_Best_Diametr_yadra6	MLP-8:3:1-OP100,CF27b	1,0	1,2	75	87	0,06	37	5	5	4,50
MLP_Best_Diametr_yadra7	MLP-8:3:1-OP100,CF25b	1,0	1,2	75	85	0,07	38	4	5	4,50
MLP_Best_Diametr_yadra8	MLP-8:3:1-OP100,CF121b	1,0	1,2	75	85	0,07	38	4	5	4,50
MLP_Best_Diametr_yadra9	MLP-8:3:1-OP100,CF89b	1,0	1,3	75	87	0,07	36	5	5	4,50
MLP_Best_Diametr_yadra10	MLP-8:3:1-OP100,CF27b	1,0	1,2	75	90	0,07	37	5	5	4,50
<b>СРЕДНЕЕ набл. 1.20</b>		<b>1,0</b>	<b>1,2</b>	<b>75</b>	<b>85</b>	<b>0,06</b>	<b>37</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	

Рис. 6. Результат симплекс-поиска с оптимальными режимами КТС

Полученные оптимальные значения предикторов  $X1 — X8$  использовались для проведения симуляционного прогнозирования, т.е. моделирования реальной производственной ситуации, задавая их в качестве входов для

каждой из 20 моделей перцептронов (табл. 9). Результат симуляционного прогнозирования представлен в табл. 12.

**Таблица 12.** Прогнозные значения диаметра ядра сварных соединений, полученные с использованием разработанных моделей перцептронов

Номер эксперимента	Архитектура / Прогнозное значение диаметра ядра	
	худшие	лучшие
1	8-11-1 / 4,502 $\approx$ 4,50	8-7-1 / 4,497 $\approx$ 4,50
2	8-3-1 / 4,475 $\approx$ 4,48	8-1-1 / 4,452 $\approx$ 4,45
3	8-1-1 / 4,468 $\approx$ 4,47	8-2-1 / 4,437 $\approx$ 4,44
4	8-5-1 / 4,428 $\approx$ 4,43	8-7-1 / 4,561 $\approx$ 4,56
5	8-7-1 / 4,496 $\approx$ 4,50	8-11-1 / 4,518 $\approx$ 4,52
6	8-2-1 / 4,458 $\approx$ 4,46	8-8-1 / 4,529 $\approx$ 4,53
7	8-9-1 / 4,562 $\approx$ 4,56	8-10-1 / 4,469 $\approx$ 4,47
8	8-5-1 / 4,484 $\approx$ 4,48	8-8-1 / 4,486 $\approx$ 4,49
9	8-5-1 / 4,496 $\approx$ 4,50	8-7-1 / 4,568 $\approx$ 4,57
10	8-7-1 / 4,481 $\approx$ 4,48	8-4-1 / 4,508 $\approx$ 4,51

Анализ прогнозных значений диаметра ядра (табл. 12) показывает, что наиболее удаленными от середины поля допуска  $d = 4,5$  мм являются значения  $d = 4,43$  мм и  $d = 4,57$  мм, полученные с использованием архитектур перцептронов 8-5-1 (эксперимент 4) и 8-7-1 (эксперимент 9) соответственно (рис. 7).

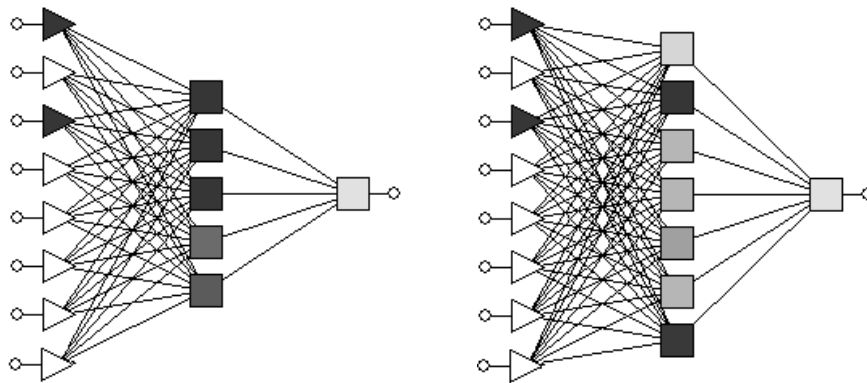


Рис. 7. Граф-модели перцептронов с архитектурами 8-5-1 и 8-7-1

Таким образом, на основе статистических испытаний моделей нейронных сетей и результатов симуляционного прогнозирования, полученных на их основе, установлен диапазон возможных отклонений диаметра ядра точечного сварного соединения от середины поля допуска.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе установленного диапазона значений диаметра ядра  $d$  с использованием инструмента «Вероятностный калькулятор» системы STATISTICA 6.1

и с учетом равной удаленности границ  $d = 4,43$  мм и  $d = 4,57$  мм от середины поля допуска рассчитывали уровень дефектности, соответствующий моделируемым условиям производства точечных сварных соединений из листов сплава Д16АТ. При этом границами допустимых средних значений диаметра ядра являлись полученные значения  $d = 4,43$  мм и  $d = 4,57$  с минимальным и максимальным возможными значениями стандартных отклонений (3)  $\sigma = 0,27$  и  $\sigma = 0,30$  (табл. 5). Результат оценки уровня дефектности, соответствующего моделируемым условиям изготовления точечных сварных соединений из листов сплава Д16АТ, приведен в табл. 13.

**Таблица 13.** Оценка моделируемого уровня дефектности соединений из листов сплава Д16АТ

Уровень дефектности, %	$\bar{x}_d \equiv Y$ , мм	$\sigma_d$ , мм
$(0,055626 + 0,0173881) \cdot 100 = 7,30$	4,43	0,27
$(0,0173881 + 0,055626) \cdot 100 = 7,30$	4,57	0,27
$(0,075881 + 0,028717) \cdot 100 = 10,46$	4,43	0,30
$(0,028717 + 0,075881) \cdot 100 = 10,46$	4,57	0,30

Анализ полученных результатов показывает эффективность предложенной методики оптимизации параметров технологического процесса КТС на основе нейросетевого моделирования, поскольку исходный диапазон уровня дефектности соединений из листов сплава Д16АТ (10,54...15,12) % (табл. 6) уменьшен до моделируемого диапазона (7,30...10,46) % (табл. 13).

Необходимо отметить, что полученный результат имеет практическую ценность в условиях серийного производства неразъемных соединений, для которых можно рекомендовать методику оптимизации технологических параметров КТС, включающую этапы:

- 1) получения исходной выборки малого объема в виде совокупности предикторов и отклика;
- 2) использования инструмента «Мастер решений» модуля «Нейронные сети» системы STATISTICA 6.1 и неравенства (4) для определения кратности повторения обучающей выборки;
- 3) проведения 10 вычислительных экспериментов по обучению нейронных сетей и отбора в каждом эксперименте из 1000 моделей одной худшей и одной лучшей моделей перцептронов по критерию дисперсионного отношения или критерию *MAPE*;
- 4) сохранения созданных 10 худших и 10 лучших моделей перцептронов с использованием языка PMML в системе STATISTICA 6.1.
- 5) реализации алгоритма симплекс-поиска для определения оптимальных значений предикторов по целевому значению отклика на основе созданных нейросетевых моделей.

Следует отметить, что практическая реализация предложенной методики в производственных условиях не требует больших временных затрат при получении итогового результата моделирования, поскольку время обучения нейронных сетей в одном эксперименте составляет порядка одной минуты, а сходимость алгоритма симплекс-поиска к целевому значению отклика осуществляется за несколько секунд.

## ВЫВОДЫ

1. На основе нейросетевого моделирования и алгоритма симплекс-поиска получено решение обратной задачи регрессии для определения оптимальных значений предикторов по заданному целевому значению отклика на примере технологического процесса КТС.

2. В результате проведения статистических испытаний моделей нейронных сетей, симуляционного прогнозирования и вероятностного моделирования обоснована возможность уменьшения уровня дефектности точечных сварных соединений по прогнозному диапазону значений параметра диаметр ядра.

3. Предложена методика получения оптимальных технологических режимов процесса изготовления соединений, отличающаяся от существующих совместным использованием алгоритма симплекс-поиска и созданных в системе STATISTICA 6.1 моделей нейронных сетей типа персептрон.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М.Д. Банов, *Технология и оборудование контактной сварки: учеб.* Москва: Издат. центр “Академия”, 2008.
2. К.А. Кочергин, *Контактная сварка.* Ленинград: Машиностроение, 1987.
3. В.П. Бурмистров, *Обеспечение качества неразъемных соединений и полуфабрикатов.* Ленинград: Машиностроение, 1985.
4. В.Н. Волченко, *Оценка и контроль качества сварных соединений с применением статистических методов.* Москва: Изд-во стандартов, 1974.
5. С.Н. Козловский, *Основы теории и технологии программированных режимов контактной точечной сварки: моногр.* Красноярск: СибГАУ, 2006.
6. Р.Ф. Катаев, В.С. Милютин, и М.Г.Близник, *Теория и технология контактной сварки: учеб. пособ.* Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015.
7. ГОСТ 15878-79 *Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры.* Москва: Изд-во стандартов, 1979.
8. А.М. Цирлин, *Оптимальное управление технологическими процессами.* Москва: Энергоатомиздат, 1986.
9. С.С. Федін та Н.А. Зубрецька, “Нейромережне моделювання та оптимізація якості продукції за технологічними параметрами”, *Технічне регулювання, метрологія та інформаційні технології: матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф. Одеської державної академії технічного регулювання та якості.* Одеса, 2019, с. 103–105.
10. *Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных*, под ред. В.П. Боровикова, 2-е изд. Москва: Горячая линия-Телеком, 2008.
11. Т. Шуп, *Решение инженерных задач на ЭВМ: практ. рук-во*, пер. с англ. Москва: Мир, 1982.
12. Л.П. Андреева, В.В. Овчинников, и А.А. Сидоров, “Оптимизация размеров точечных соединений при электроконтактной сварке алюминиевых сплавов”, *Современные материалы, техника и технологии*, № 3 (3), с. 23–32, 2015.
13. В.В. Овчинников и В.И. Рязанцев, *Технологические основы контактной сварки легких сплавов.* Москва: МГИУ, 2006.
14. В.И. Рязанцев и Б.Б. Золотарев, “Зависимость циклической прочности соединений, выполненных точечной сваркой от размеров литого ядра”, *Автоматическая сварка*, № 3, с. 26–28, 1981.

15. М.І. Жалдак та Ю.В. Триус, *Основи теорії і методів оптимізації: навч. посіб.* Черкаси: Брама-Україна, 2005.
16. А.В. Назаров и А.И. Лоскутов, *Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем.* Санкт-Петербург: Наука и Техника, 2003.
17. М.С. Слободян, “Способы создания неразъемных соединений циркониевых сплавов в реакторостроении (обзор)”, *Цветные металлы*, № 10, с. 43–50, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.17580/tsm.2016.10.06>
18. *Алюминий Д16АТ [Электрон. Ресурс]*. Доступно: <https://nfmetall.ru/articles/48.html> (дата обращения 15.03.2020).
19. А.И. Галушкин, *Теория нейронных сетей: учеб. пособ. для вузов*, под общ. ред. А.И. Галушкина, кн. 1. Москва: ИПРЖР, 2000.
20. В.В. Круглов и Борисов В.В., *Искусственные нейронные сети. Теория и практика.* Москва: Горячая линия-Телеком, 2001.
21. Л.Н. Ясницкий, *Введение в искусственный интеллект: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений.* Москва: Изд-во «Академия», 2005.

Поступила 02.07.2020

#### INFORMATION ON THE ARTICLE

**S.S. Fedin**, ORCID: 0000-0001-9732-632X, National transport university, Ukraine, e-mail: [sergey\\_fedin@bigmir.net](mailto:sergey_fedin@bigmir.net).

**N.A. Zubretska**, ORCID: 0000-0003-0439-330X, National transport university, Ukraine, e-mail: [zubr2767@gmail.com](mailto:zubr2767@gmail.com).

#### NEURAL NETWORK MODELING AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CONTACT SPOT WELDING / S.S. Fedin, N.A. Zubretska

**Abstract.** A method is proposed for establishing the optimal values of technological process parameters when solving the inverse multivariate regression problem based on neural network modeling and the simplex search algorithm. The practical application of the method is implemented using the contact spot welding process as an example. It aims to optimize the design parameter – the core diameter of welded joints to reduce their defects during serial production.

**Keywords:** neural network model, optimization, simplex search, spot welded joints, core diameter, defectiveness level.

#### НЕЙРОМЕРЕЖНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНТАКТНОГО ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ / С.С. Федін, Н.А. Зубрецька

**Анотація.** На основі нейромережного моделювання та алгоритму симплекс-пошуку запропоновано методику встановлення оптимальних значень параметрів технологічних процесів для розв'язання оберненої задачі багатофакторної регресії. Практичне використання методики реалізовано на прикладі технологічного процесу контактної точкової зварювання та спрямовано на оптимізацію конструктивного параметра — діаметра ядра зварних з'єднань для зменшення рівня їх дефектності під час серійного виготовлення.

**Ключові слова:** модель нейронної мережі, оптимізація, симплекс-пошук, точкові зварні з'єднання, діаметр ядра, рівень дефектності.

#### REFERENCES

1. M.D. Banov, *Technology and equipment of contact welding.* Moscow, Russia: Academy, 2008.
2. K.A. Kochergin, *Contact welding.* Leningrad, Russia: Mashinostroenie, 1987.
3. V.P. Burmistrov, *Quality assurance of one-piece connections and semi-finished products.* Leningrad, Russia: Mashinostroenie, 1985.

4. V.N. Volchenko, *Assessment and quality control of welded joints using statistical methods*. Moscow, Russia: Standards Publishing House, 1974.
5. S.N. Kozlovsky, *Fundamentals of the theory and technology of programmed modes for resistance spot welding*. Krasnoyarsk, Russia: SibGAU, 2006.
6. R.F. Kataev, V.S. Milyutin, and M.G. Bliznik, *Theory and technology of contact welding*. Yekaterinburg, Russia: Ural university Publishing House, 2015.
7. GOST 15878-79 *Contact welding. Welded connections. Structural elements and dimensions*. Moscow, Russia: Standards Publishing House, 1979.
8. A.M. Tsirlin, *Optimal control of technological processes*. Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1986.
9. S.S. Fedin, N.A. Zubretska, “Neural network modeling and optimization of product quality by technological parameters”, in *IX International scientific-practical conf. Technical regulation, metrology and information technologies*, Odessa, 2019, pp. 103–105.
10. V.P. Borovikov et al., *Neural networks. STATISTICA Neural Networks: Methodology and Technologies of Modern Data Analysis*. Moscow, Russia: Hotline-Telecom, 2008.
11. T. Shup, *Solving Engineering Problems on a Computer: A Practical Guide*. Moscow, Russia: Mir, 1982.
12. L.P. Andreeva, V.V. Ovchinnikov, and A.A. Sidorov, “Optimization of the spot joints size in electric contact welding of aluminum alloys”, *Modern materials, equipment and technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 23–32, 2015.
13. V.V. Ovchinnikov and V.I. Ryazantsev, *Technological bases of light alloys resistance welding*. Moscow, Russia: MGIU, 2006.
14. V.I. Ryazantsev, B.B. Zolotarev, “The dependence of the cyclic strength of spot welded joints on the dimensions of the cast core”, *Automatic welding*, no. 3, pp. 26–28, 1981.
15. M.I. Zhaldak and Yu.V. Trius. *Fundamentals of theory and methods of optimization*. Cherkasy, Ukraine: Brahma-Ukraine, 2005.
16. A.V. Nazarov and A. I. Loskutov, *Neural network algorithms for forecasting and optimizing systems*. St. Petersburg, Russia: Science and Technology, 2003.
17. M.S. Slobodyan, “Methods of creating permanent joints of zirconium alloys in reactor construction (review)”, *Non-ferrous metals*, no. 10, pp. 43–50, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.17580/tsm.2016.10.06>
18. *Aluminum D16AT* [Online]. Available: <https://nfmetail.ru/articles/48.html>. Accessed on: March 15, 2020.
19. A.I. Galushkin, *Theory of neural networks*. Moscow, Russia: IPRZhR, 2000.
20. V.V. Kruglov and V.V. Borisov, *Artificial neural networks. Theory and practice*. Moscow, Russia: Hotline-Telecom, 2001.
21. L.N. Yasnitsky, *Introduction to artificial intelligence*. Moscow, Russia: “Academy”, 2005.



## АНАЛІЗ РИЗИКІВ ПРОЕКТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕКСТОВОГО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ КОМЕНТАРІВ У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ JIRA

А.А. ЛЕДНІКОВА, Д.В. ШИПІК, П.І. БІДЮК

**Анотація.** У ході дослідження розроблено методологію та створено програмний продукт для визначення ризиків проекту на базі комунікації розробників, подано результати роботи програми на даних реального проекту CASSANDRA компанії Apache Software Foundation. Методологію реалізовано на основі вже відомих алгоритмів визначення емоційних складових у тексті VAD та матричних методів аналізу ризиків проекту з використанням власних розробок, що дозволяють об'єднати ці різні підходи. Визначення назви потенційних ризиків визначається за допомогою моделі побудови тем LDA. Отримані результати допоможуть визначити важливість задачі відповідно до комунікацій та ранжувати їх у середині проекту за важливістю та потреби додаткової уваги, що в контексті продукту дасть змогу менеджерам проекту більш швидко розуміти та вирішувати проблеми.

**Ключові слова:** аналіз ризиків проекту, імовірнісний латентний семантичний аналіз, модель латентного розподілу Діріхле, оброблення природної мови, аналіз тональності тексту.

### ВСТУП

Сфера інформаційних технологій (ІТ) розвивається дуже швидко і стрімко, так само як і її представники. Компанії динамічно зростають і дедалі більше стають децентралізованими. Але чим більша компанія та команда, тим більше потреб у її менеджменті. Agile Software Development (ASD) стає найпоширенішою технікою управління проектами: організації шукають способи бути більш гнучкими, тоді як 71% організації уже повідомляють про використання цих підходів для своїх проектів [1].

У управлінні проектами є декілька складових, одна з яких найбільш важлива і водночас найбільш трудомістка, — це аналіз ризиків, метою якого є забезпечення виконання завдань проекту в певний час і за наявності певної кількості ресурсів. Такий тип управління повинен здійснюватися протягом усього часу існування проекту.

Для моніторингу поточного стану ризиків можна визначити показники ризиків. Ці показники можуть бути кількісними (імовірність витрати на контрольні заходи) або якісними (оцінка мотивації персоналу проекту). Інший метод моніторингу полягає у використанні тригерів як порогових значень для показників, які запускають заходи, коли їх досягнуто.

Найпопулярнішим інструментом за кількістю користувачів (понад 50 мільйонів користувачів) для управління ІТ проектами на тепер є Jira. Це система для відстеження помилок і проблем, яка надає спільне середовище, де члени команди можуть подавати і обговорювати питання, потребувати поради і ділитися думками, корисними для заходів з підтримання або дизай-

нерських рішень [2, 3]. Зазвичай проекти приватні, але деякі компанії, які надають безкоштовні програмні продукти, мають відкриті репозиторії, завдяки яким кожен користувач має змогу відстежувати стан проекту, створювати завдання, коментувати та допомагати у їх розробленні. Прикладом такої компанії є Apache Software Foundation [4].

Згідно з Atlassian, найбільшою проблемою, з якою стикаються команди сьогодні, — це спілкування [5]. Коли роботу в команді виконано правильно, переваги очевидні:

- 50% більш мотивовані успіхом команди, ніж компанії (27%), або індивідуальним успіхом (23%);
- 43% вважають, що вони мають великий особистий вплив на місію своєї основної команди проти 33% на місію компанії в цілому;
- 56% почувають впевненіше працювати в команді, ніж індивідуально.

Оскільки інженерія програмного забезпечення є інтенсивною діяльністю людського капіталу, важливість управління емоціями у професії програмного забезпечення очевидна. Емоції є ключовими проблемами в поведінці людей [6]. Чим більше методологія бере до уваги людські фактори, тим успішнішою вона стає в реальному світі. Це тому, що людські та соціальні фактори справляють сильний вплив на успіх розроблення програмного забезпечення та остаточної системи [7].

У контексті системи Jira дані коментарів та журналів завдань є цінною інформацією для визначення поточного стану розроблення. Аналізуючи їх на предмет висловлюваних емоцій або певних ключових слів, можливо створити матрицю ризиків для виявлення проблем, пов'язаних з людським фактором та комунікаціями [2]. Побудова тематичних моделей дає змогу дати швидке та чітке уявлення про сутність проблеми. Використання такого підходу до історичних даних допоможе отримати цінні уроки минулого для більш ефективної роботи у майбутньому.

Одним з перших досліджень у напрямі визначення емоцій розробників, а не їх поведінки, було проведено А. Murgia, Р. Tourani, В. Adams, М. Ortu, яке порушило питання про відсутність досліджень у цій галузі [2]. Автори позначили коментарі як «одне повідомлення – одна емоція», використовуючи рамки Парротта (любов, радість, здивування, гнів, смуток, страх), щоб виміряти людську згоду щодо їх присутності у звітах про проблеми.

Дослідження, проведене М. Ortu, G. Destefanis, В. Adams та ін., також показало, що «коментарі розробників містять не тільки технічну інформацію, але й цінну інформацію про почуття та емоції» [8]. R. Jongeling [9] використовував цей набір даних, щоб перевірити, чи інструменти для навчання машин для емоцій, отримані від соціальних даних, узгоджуються з даними, позначеними вручну. Пізніше наявність цього сховища спонукала до подальших досліджень та експериментів з емоцій розробників: виявлення вигорання та продуктивності [10, 11], вимірювання афективності та ефективності [10], моделювання напряму емоції гніву та аналізу ввічливості.

М. Mäntylä, В. Adams, G. Destefanis та ін. [10] використовували цей набір даних у зв'язку з VAD-лексиконом (Valence, Arousal, Dominance) з 13 915 англійських слів [12] для аналізу VAD у звітах про завдання, оскільки вони вважають, що «використання вимірного підходу більш вигідне ніж використання дискретного підходу, оскільки розмір може залежати від вигорання і продуктивності».

Тематичне моделювання є одним з найпопулярніших імовірнісних алгоритмів кластеризації, який останнім часом набуває дедалі більшої уваги. Основною ідеєю моделювання тематики є створення імовірнісної генеративної моделі для корпусу текстових документів. У тематичних моделях документи являють собою сукупність (суміш) тем, де тема — розподіл імовірностей над словами.

Дві основні моделі теми — імовірнісний латентний семантичний аналіз (pLSA) [13] і модель латентного розподілу Діріхле (LDA) [14]. Т. Hofmann [13] увів pLSA для моделювання документів, але вона не забезпечує жодної ймовірнісної моделі на рівні документа, що ускладнює її узагальнення для моделювання нових невідомих документів. D. Blei, A. Ng, M. Jordan розширили її, увівши розподіл Діріхле як ваг суміші тем для кожного документа і назвали її моделлю латентного розподілу Діріхле (LDA) [14].

Модель латентного розподілу Діріхле є сучасною технікою «без учителя» для вилучення тематичної інформації (тем) зі збірника документів. Основна ідея полягає в тому, що документи подані у вигляді випадкової суміші прихованих тем, де кожна тема є розподілом імовірностей над словами.

Е. Guzman у своїй праці [15] описала прототип візуалізації, який подає огляд емоційного клімату проекту на основі текстової інформації, як-от пошти та артефакти. Вона складається з двох основних частин: вилучення емоцій із Senti Strength і моделювання тематики з LDA. Перший виражений в кольорах (зелений — позитивний, жовтий — нейтральний і пурпуровий — негативний) і розмір кола, а другий — у хмарах слів.

Дослідження присвячено вивченню емоцій, виражених у системі відстеження проблем Apache Jira для їх перетворення у ризики та надання автоматизованих інструментів для подальшого можливого розроблення системи підтримання прийняття рішень для управління проектним ризиком, пов'язаних з людськими і соціальними факторами.

## **ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ**

### **Мета дослідження:**

- 1) дослідження ризиків проектів сфери ІТ та методів їх виявлення;
- 2) дослідження існуючих методів та алгоритмів для інтелектуального аналізу тексту на предмет тригерів ризиків;
- 3) розроблення методології використання інтелектуального аналізу тексту для ідентифікації та аналізу ризиків проекту;
- 4) розроблення програмного забезпечення для проведення експериментів за даною методологією;
- 5) аналіз результатів та рекомендації щодо подальших досліджень.

## **ВИКЛАДЕННЯ ТЕОРІЇ**

**Визначення емоційних показників.** Спочатку кожний коментар позбавляється від пунктуації та чисел, а потім розбивається на токени, у результаті отримуємо подання у вигляді «мішка слів» (Bag-Of-Words). Далі лематизуємо кожний токен, тобто зводимо його до початкової форми.

Для кожного токена коментаря визначаємо показники валентності, збудження і домінування (ВЗД) за таблицею оцінок А. Wattiner [12] з 13 915 англійських слів, залишаючи для подальшого розрахунку лише максимальні та мінімальні значення показників з усіх слів.

Перед прикладом розглянемо значення кожної зі складових [10].

*Валентність (Valence)* — це емоційний вимір, пов'язаний з привабливістю (або несприятливістю) події, об'єкта або ситуації. Термін означає напрям поведінкової активації до стимулу (апетитною мотивацією) або відхилення від нього (аверсивною мотивацією).

*Збудження (Arousal)* — це розмірність, що вказує рівень емоційної активації. Вона має різні фізіологічні та психологічні реакції, наприклад, підвищену частоту серцевих скорочень і настороженість до відповідей і сприймається як відчуття реактивності до подразників та психічного збудження. Збудження також посилює задоволення або невдоволення, що описується валентним виміром, наприклад, розчарування може змінити гнів, а мирне щастя може змінитися в заховлення, коли збудження збільшується.

*Домінантність (Dominance)* являє собою зміну відчуття контролю над стимулом (або ситуацією).

Розглянемо декілька прикладів з табл. 1. Кохання та радість мають більшу валентність як позитивні емоції, смуток — більш пасивну природу, тож отримує низькі показники збудження та домінування.

**Таблиця 1.** Подання слів у просторі ВЗД

Слово	Валентність	Збудження	Домінування
Anger / гнів	2,50	5,93	5,14
Joy / радість	8,21	5,55	7,00
Sadness / смуток	2,40	2,81	3,84
Love / кохання	8,00	5,36	5,92
Середнє	5,06	4,21	5,19

Для особливих випадків, коли максимум (max) нижчий від середнього значення або коли мінімум (min) вищий, установлюємо max або min до середнього значення всіх слів лексики. Далі використовуємо дані значення для розрахунку відносних показників за такою формулою:

$$Range(\bar{w}) = \begin{cases} \max(\bar{w}) - avg(\bar{W}), & \text{if } \min(\bar{w}) > avg(\bar{W}), \\ avg(\bar{W}) - \min(\bar{w}), & \text{if } \max(\bar{w}) < avg(\bar{W}), \\ \max(\bar{w}) - \min(\bar{w}), & \text{if } \min(\bar{w}) \leq avg(\bar{W}) < \max(\bar{w}). \end{cases} \quad (1)$$

Наприклад, якщо коментар буде містити всі слова, наведені в табл. 1, він отримує оцінку валентності 5,81 (8,21–2,40, третій випадок у формулі). Чим вище значення, тим більш екстремальні бали ВЗД.

Таким чином, дані показники визначають значущість наявності цих емоційних станів і ступінь їх відмінності від середніх значень.

**Аналіз ризиків задачі.** Задача може мати багато коментарів, включаючи й негативні, але якщо останні позитивні та вирішують проблему, то їх вага повинна бути більшою від попередніх.

Таким чином за точку відліку можна взяти час першого коментаря (0), а за верхню межу (1) — поточний час, нормування часу коментаря у цьому проміжку дає вагу актуальності коментаря.

Таким чином для кожного коментаря маємо: валентність, збудження, домінування, актуальність. Для задачі отримаємо зважені оцінки:

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i s_i, \quad (2)$$

де  $S$  — загальна оцінка задачі (валентність / збудження / домінування);  $S_i$  — оцінка (валентність / збудження / домінування) коментаря;  $w_i$  — актуальність коментаря.

**Перехід до матриці ризиків** (рис. 1). Таблиці оцінки ризиків дають змогу організаторам подій розподіляти рейтинги ризиків на всі небезпеки, щоб вони могли визначати пріоритети та систематично вирішувати їх.

CONSEQUENCE					
LIKELIHOOD*	Insignificant 1	Minor 2	Moderate 3	Major 4	Catastrophe 5
A (Almost certain)	H	H	E	E	E
B (Likely)	M	H	H	E	E
C (Possible)	L	M	H	E	E
D (Unlikely)	L	L	M	H	E
E (Rare)	L	L	M	H	H

Рис. 1. Матриця ризиків

За даною таблицею маємо такі типи ризиків:

- E = екстремальний: необхідні негайні дії;
- H = високий ризик: необхідна увага старшого керівництва;
- M = помірний: відповідальність керівництва має бути визначена;
- L = низький: управління за допомогою рутинних процедур.

Кожен тип ризику є результатом поєднання двох його властивостей — імовірності (табл. 2) та значущості наслідків (табл. 3).

**Таблиця 2.** Імовірність наслідків

Рівень	Значення	Опис	Приклад детального опису події
A	5	Безумовно	Очікується, що це відбудеться в більшості випадків
B	4	Імовірно	Імовірно, відбудеться в більшості випадків
C	3	Можливо	Може відбутися у певний час
D	2	Непевно	Може статися через деякий час
E	1	Рідко	Може відбуватися, але тільки за виняткових обставин

Рівні значущості та відповідні пріоритети, що використовуються в JIRA, наведено в табл. 3.

Таким чином, інтегрований показник ВЗД може бути вірогідністю, у той час як важливість зазвичай визначається менеджером.

**Таблиця 3.** Значущість наслідків

Рівень	Опис	Тип Jira	Приклад детального опису
1	Мізерна	Trivial	Косметична проблема, як помилкові слова або змішаний текст
2	Незначна	Minor	Незначна втрата функції або інші незначні проблеми
3	Помірна	Major	Велика втрата функціональності
4	Значна	Critical	Аварії, втрата даних
5	Катастрофа	Blocker	Блокує розроблення та / або роботу з тестування, процедура виконання проєкту не працює

Також важливість може бути збагачена вагами для типу завдання (баг, фікс), тривалістю виконання завдання (чим довше, тим гірше), а найголовніше — структурою проєкту, тобто скільки завдань може бути в очікуванні через поточне, скільки виконавців поточних та супутніх завдань.

Імовірність ризику оцінюємо за табл. 4.

**Таблиця 4.** Імовірність як інтегрований показник ВЗД

Рівень	Значення	Опис	Інтегрований показник ВЗД
A	5	Безумовно	$\geq 10$
B	4	Імовірно	(10, 8]
C	3	Можливо	(7, 5]
D	2	Непевно	(5, 2]
E	1	Рідко	$< 2$

Визначаємо загальну оцінку ризику як добуток імовірності на значущість.

$$VR = A \cdot q, \quad (3)$$

де  $VR$  — важливість ризику;  $A$  — загроза (наслідок, дія) ризику (небажаної події);  $q$  — імовірність її настання.

**Визначення теми ризику.** Для швидкого оцінювання ситуації потрібно розуміти, що саме відбулося не так. У цьому можуть допомогти кілька ключових слів або тематика проблеми.

Одним з найбільш поширених методів побудови тематичних моделей є Latent Dirichlet Allocation (LDA), що моделює документ як розподіл тем і тему як розподіл слів. Тут документ — це коментар.

Розглянемо ігрову модель LDA, що виробляє такі теми:

**Тема 0:** '0,075\*"patch" + 0,040\*"fix" + 0,039\*"cassandra\_num\_" + +0,020\*"trunk" + 0,020\*"attach" + 0,017\*"v\_num\_" + 0,015\*"apply" + +0,013\*"change" + 0,011\*"version" + 0,011\*"issue"'.  
 Тема 1: '0,018\*"thrif" + 0,017\*"table" + 0,016\*"make" + 0,015\*"change" + 0,014\*"cql\_num\_" + 0,014\*"use" + 0,013\*"patch" + 0,013\*"bq" + +0,012\*"would" + 0,012\*"think"'.  
 Тема 2: '0,043\*"cql" + 0,028\*"id" + 0,020\*"select" + +0,020\*"num\_e\_num\_" + 0,016\*"make" + 0,016\*"would" + 0,010\*"loop" + +0,009\*"pprop" + 0,009\*"eentid" + 0,009\*"python"'.  
 Тема 3: '0,036\*"flush" + 0,017\*"write" + 0,017\*"call" + 0,012\*"memtable"+ + 0,012\*"segment" + 0,011\*"thread" + 0,011\*"replay" + 0,011\*"get" + +0,010\*"new" + 0,009\*"need"'

Тоді подання речення “moves strategy creation into Table instantiation so it can't be out of sync” в цьому просторі буде [(0; 0,1), (1; 0,50), (2; 0,16), (3; 0,24)].

Алгоритм LDA ґрунтуються на попередньому розподілі Діріхле і передбачає модель «мішок слів» — модель для аналізу текстів, яка враховує тільки частоту слів, але не їх порядок. Ця модель добре підходить для тематичного моделювання, оскільки вона дозволяє виявляти неявні зв'язки між словами. Метод LDA виконує м'яку кластеризацію і припускає, що кожне слово у реченні генерується деякою прихованою темою, яка визначається розподілом імовірностей на множині всіх слів тексту.

Маючи корпус  $D$ , що складається з  $M$  документів, для документа  $d$ , що має  $N_d$  слів ( $d \in \{1, \dots, M\}$ ), LDA моделює  $D$  згідно з таким генеративним процесом [14]:

- 1) вибір поліноміального розподілу  $\varphi_t$  для теми  $t$  ( $t \in \{1, \dots, T\}$ ) з розподілу Діріхле з параметром  $\beta$ ;
- 2) вибір поліноміального розподілу  $\theta_d$  для документа  $d$  ( $d \in \{1, \dots, M\}$ ) з розподілу Діріхле з параметром  $\alpha$ ;
- 3) для кожного слова  $w_n$  ( $n \in \{1, \dots, N_d\}$ ) у документі  $d$ :
  - а) вибрати тему  $z_n$  з  $\theta_d$ ;
  - б) вибрати слово  $w_n$  з  $z_n$ .

У згаданому генеративному процесі слова в документах — єдині спостережувані змінні, тоді як інші — латентні змінні ( $\theta$ ) і гіперпараметри ( $\alpha$  і  $\beta$ ). Для того щоб зробити висновок про приховані змінні і гіперпараметри, імовірність спостережуваних даних  $D$  обчислюється і максимізується таким чином:

$$P(D | \alpha, \beta) = \prod_{d=1}^M \int p(\theta_d | \alpha) \left( \sum_{n=1}^{N_d} p(z_{dn} | \theta_d) p(w_{dn} | z_{dn}, \varphi) P(\varphi | \beta) \right) d\theta_d d\varphi.$$

Унаслідок зв'язку між  $\theta$  і  $\varphi$  у підінтегральній функції у формулі (3), точний висновок у LDA є нерозв'язним. Різні наближувальні алгоритми, такі як варіаційний висновок або ланцюг Маркова Монте-Карло (MCMC), зазвичай використовуються для виведення в LDA.

У цій роботі будемо використовувати пакет *gensim*, який має реалізацію *online LDA*. Цей алгоритм використовує стохастичну оптимізацію, щоб максимізувати варіаційну цільову функцію для моделі тематичного розподілу прихованих Діріхле (LDA). Він тільки оцінює підмножину загального корпусу документів кожної ітерації і тим самим здатний швидко знайти локально оптимальне налаштування варіаційного апостера над темами [16].

Для визначення теми агрегуємо всі коментарі та застосуємо модель LDA, роблячи припущення, що кількість тем відповідає кількості задач.

Для оцінювання моделей теми використовується когерентність теми, для якої існує дві основні метрики —  $C_v$  і  $C_{umass}$ .

Метрика  $C_v$  базується на ковзному вікні, однокомпонентній сегментації топ-слів і непрямій мірі підтвердження, що використовує нормалізовану точкову взаємну інформацію (NPMI) і схожість за косинусом. Ця міра когерентності отримує кількість зустрічання слів для заданих слів за допомогою

ковзного вікна і розміру вікна 110. Підрахунки використовуються для обчислення NPMI кожного топ-слова для кожного іншого топ-слова таким чином, що створює набір векторів для кожного топ-слова:

$$\text{NPMI}(w_i, w_j) = \frac{\log \frac{P(w_i, w_j) + e}{P(w_j)}}{\log(P(w_i, w_j) + e)}.$$

Однокомпонентна сегментація топ-слів потребує розрахунку подібності вектора кожного топ-слова і суми векторів усіх топ-слів. Як міра подібності використовується косинус. Когерентність — це середнє арифметичне з цих подібностей [17].

Метрику  $C_{umass}$  запропонував D. Mimno et al. [18]. Ця метрика бере до уваги упорядкування серед топ-слів теми і має вигляд

$$C_{umass} = \frac{2}{N * (N - 1)} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \log \frac{P(w_i, w_j) + e}{P(w_j)},$$

де  $N$  — кількість топ-слів, узятих для аналізу.

Оскільки в будівні моделі враховується безліч коментарів, то для визначення теми документа топ-словами можуть бути слова, не притаманні даній проблемі, але дуже близькі. Для цього краще виконати перетин слів і поза вагою слова у теми врахувати вагу (імовірність) самої теми. Тоді алгоритм визначення теми ризиків задачі виглядатиме так:

- 1) Створити порожню таблицю  $T$  для слів і ваг задачі.
- 2) Для кожного коментаря  $C_i$  обраної задачі:

- визначити список слів  $W$  коментаря;
- визначити теми  $T$  коментаря;
- для кожної теми  $T_i$  та ваги цієї теми  $topic\_weight$  для коментаря  $C_i$ :

визначити топ- $N$  слів  $W_i^t$  з вагами  $word\_weigh$  кожного слова;

якщо слово наявне в коментарі, то  $T[word] += word\_weigh * topic\_weight$ .

Найбільш зручним поданням теми є хмара слів (word clouds) (рис. 2). Оскільки після моделювання отримаємо набір пар слово–вага, то можемо створити зображення, де розмір слова буде пропорційний його вазі.



Рис. 2. Приклад хмари слів



## ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ

Датасет `jira_emotion` [19] являє собою набір даних, витягнутих з Jira ITS чотирьох популярних екосистем з відкритим вихідним кодом (а також інструментів та інфраструктури, що використовуються для здобування інформації) спільноти Apache Software Foundation, Spring, JBoss та CodeHaus. Повний набір даних (включаючи проекти Apache) містить 3516 завдань та 25306 коментарів 1375 авторів. У розгляданому випадку використано лише поля `comment`, `issue_report_id` та `updateDate` з таблиці `jira_issue_comment`, а також поля `id`, `priority` та `project` з таблиці `jira_issue_report`. Як приклад було обрано достатньо відомий проект CASSANDRA компанії Apache Software Foundation. Тож у подальших розділах розглядаються задачі та коментарі, що стосуються лише цього проекту. Усього 41966 коментарів у 6271 задачах з 2009-03-07 по 2013-12-18.

Після обчислень для кожної задачі маємо:

- імовірність як зважена сума ВЗД коментарів;
- значущість, що визначена менеджером проекту, у цьому випадку поле `priority` з таблиці `jira_issue_report`;
- ключові слова та ваги, з яких можна отримати хмару слів.

Приклади коментарів з найвищими та найнижчими оцінками подано у вигляді рис. 3. Візьмемо перший запис — задачу 333428; вона має лише один коментар такого змісту зі значенням ВЗД 4,62; 3,26; 3,51:

- `default_validation_class` means "all data that isn't explicitly in `column_metadata` conforms to this data type." So you've violated that. You have two options:

- set `d_v_c` to `ByteType` (the default);
- leave the column definition alone, but only drop the index part (maybe this is what you were trying to do, but you changed from "colour" to "color").

Id	integra_value	integra_value_weighed	likellhood	priority	priority_value	rate
333428	11,390000	11,390000	5	Blocker	5	25
329678	11,130000	11,130000	5	Blocker	5	25
333669	10,755556	10,737776	5	Blocker	5	25
331283	10,720000	10,720000	5	Blocker	5	25
329510	10,184286	10,184142	5	Blocker	5	25
333505	11,730000	11,730000	5	Critical	4	20
333436	11,518667	11,514989	5	Critical	4	20
330706	10,750000	10,750000	5	Critical	4	20

Рис. 3. Кінцевий показник та імовірність для розв'язання задач

*More generally, note that best practice is to only use `d_v_c` in CFs with dynamic column names. I.e., if you know what the columns are going to be in the CF ahead of time as you do here, you shouldn't use `d_v_c`.*

Автор надав розгорнуту відповідь, але з контексту не зрозуміло, чи вирішує він цю проблему, чи ні. Особливо беручи до уваги речення "So

you've violated that" (Так, що ви порушили це); задача потребує уваги, тож отримане маркування має сенс. Розглянемо ще декілька прикладів (рис. 4).

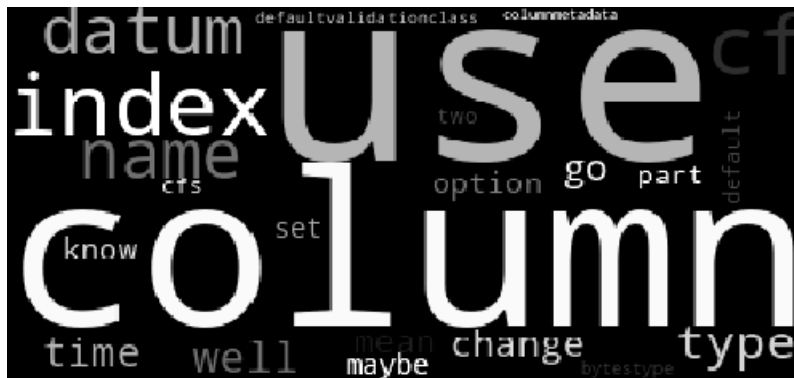


Рис. 4. Приклад маркування

Розглянемо коментарі задачі 329510 (табл. 5). Їх досить багато і лише знаявності логів помилки можна зрозуміти, що проблема є і вона потребує вирішення.

Таблиця 5. Коментарі задачі 329510

Коментар	ВЗД	Σ
Those fail for me too, but that should be an easy bisect	[5,14; 1,68; 2,05]	8,87
Looking at TokenMetadataTest, it was just assuming the last test in the file was actually running last and apparently that wasn't happening on my box. Ninja-fixed that one in commit 0a5a766 to not depend on the tests execution order	[4,13; 3,33; 3,45]	10,91
Looks pretty similar to what I did in 7de6f9666 to fix them in 1.1, except I used the shotgun method :) So if that fixes it, then +1	[4,2; 3,12; 1,8]	9,12
Alright, ScrubTest was another instance of tests expecting to run in a particular order (don't know why my box don't run them in the order they are declared but well, expecting a particular order is a bad idea in any case) so ninja-fixed that. I've also committed the 2 patches attached above. This fixes the failure I'm saying, except for the pig tests, but as those are clearly a setup thing I don't want to block 1.2.12 for that and I've open CASSANDRA-6376 to deal with them. Closing this issue	[5,74; 2,94; 3,97]	12,65
Btw, also got all pig tests to fail with the following exceptions: {noformat} [junit] Testcase: org.apache.cassandra.pig.CqlTableDataTypeTest: [junit] <error log> I wouldn't block a release because of pig tests, but if it does not just fail for me, it would be nice to fix it too	[4,62; 1,97; 2,66]	9,25
For LeaveAndBootstrapTest, this bisects to CASSANDRA-6244. So I think this is just a case of "we've made things asynchronous so we now check the expected result before the computation is done". Tried adding a few calls to PRCS.blockUntilFinished in the few places that were failing for me and that seems to fix the test. Attaching the resulting patch. [~brandon.williams] can you check it's not entirely stupid?	[4,35; 2,66; 2,76]	9,77
Regarding the ConcurrentModificationException, it seems that the only reason this could get triggered is due to TMD.clearUnsafe(). As this is called by tests, this is not a real problem, but what about making it grab the writeLock like any good citizen to avoid getting scary stack traces (and don't discard a real bug later on because we've grown used to discarding such stack)? Attaching patch to do that	[4,57; 3,46; 2,69]	10,72

Читати всі коментарі досить важко, особливо, якщо зважати, що вони суто технічні та наповнені термінологією. Але завдяки інструменту побудови назви ризику можна швидко зрозуміти, що проблеми спричинені помилками з junit, patch і можливо іншою задачею проекту (рис. 5).



Рис. 5. Приклад помилки з Unit.patch

Розглянемо декілька задач зі значущістю 1 (табл. 6). Із тексту коментарів бачимо, що задачі дійсно не потребують додаткової уваги.

Таблиця 6. Коментарі задач з низькою значущістю

Задача	Коментар	ВЗД	$\Sigma$
331618	bah, just realised you can use comparator= 'Composite Type(UTF8Type, UTF8Type)'	[0,116; 0,021; 0,185]	0,322
332691	duplicate of CASSANDRA-3164	[0,364; 0,289; 0,315]	0,968
330393	Resolving now that it's in trunk	[0,044; 0,701; 0,275]	1,02
333721	done as part of CASSANDRA-2521	[0,294; 0,851; 0,025]	1,17
329561	{{ECHO OFF}}	[0,136; 0,601; 0,595]	1,33
	(this should be ninja-d)	[0,076; 1,399; 0,045]	1,52

Розглянемо, як розподілені задачі залежно від значущості. Як бачимо з рис. 5, 6 коментарів, які дійсно потребують уваги, небагато, то їх важливо відокремити від інших, щоб швидше реагувати.

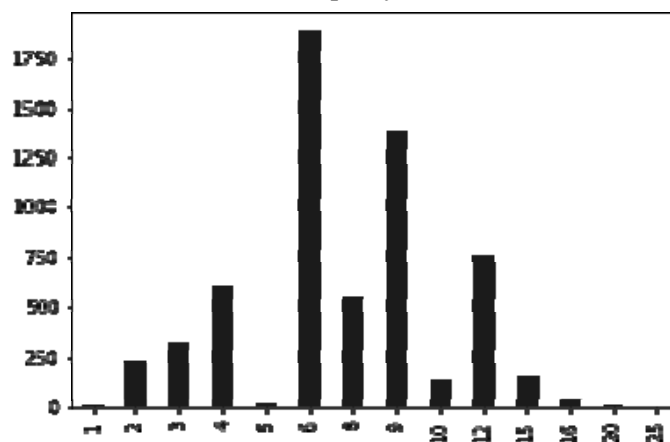


Рис. 6. Частоти появи ризиків

Розглянемо приклад задачі 334028 з найбільш частотною значущістю ризику 6, коментарі якої наведено в табл. 7 Як бачимо зі змісту коментарів, проблема була, але вона успішно вирішена і більше не потребує уваги. Однак перші два коментарі мають великі значення інтегрованого показника, і тоді задача мала б ризик великої ймовірності, а отже, і значущості.

**Таблиця 7.** Коментарі задачі 334028

Коментар	ВЗД	Σ
I did a bit more tests and here are some results which might help: 1. JMX port set to 9090 in cassandra-env.sh 2. On the machine where another service running on 8080 we get exception above 3. On the machine where no service running on 8080 we don't get any exception and MX4J runs on port 9090 Seems like something checks for port 8080 even though it is configured to run on 9090	[3,92; 2,29; 2,83]	9,04
I think there's a confusion. There are two ports in business, one is the JMX port (default is 8080) and one is the MX4J port (default 8081) If the JMX port is used when cassandra starts you see the following exception, which is different from what's pasted in this bug report: <error log> So the problem in this case. I believe was that mx4j's port was bound to a different process To control the port used by mx4j use -Dmx4jport=8082. See <a href="https://issues.apache.org/jira/browse/CASSANDRA-1068">https:// issues.apache.org/jira/browse/CASSANDRA-1068</a> for more details. I think this is not a bug and recommend to close it as such I will, however, attach a patch for trunk to make this more obvious and add -Dmx4jport=8081 to conf/cassandra-env.sh	[5,05; 4,17; 4,06]	13,28
Patch that adds the variables MX4J_ADDRESS and MX4J_PORT to conf/cassandra-env.sh make configuration for mx4j obvious	[1,65; 1,371; 2,39]	5,411
You right Ran, I checked this machine again and I have another service listening on 8081 For some reason I thought that MX4J uses same port With config options we can close it now	[2,32; 2,05; 2,49]	6,86
committed, thanks!	[2,706; 0,881; 1,705]	5,292

Якщо побудуємо хмару слів, то серед найважливіших побачимо “thank” (дякую), що також може бути натяком на розв’язану проблему (рис. 7).



Рис. 7. Хмара слів для “thank”

## **АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Із наданих прикладів можна бачити, що використання лише цих трьох емоційних складових достатньо для ранжування коментарів та задач залежно від наявності потенційних проблем та напруження у коментарях.

Надалі можна розглянути та застосувати інші емоційні фреймворки та показники, наприклад, визначати рівень ввічливості або агресивності. Також можна застосувати сентиментальний аналіз і використати його оцінку як окремий вимір.

Із погляду семантики поліпшити результати можна за рахунок особливостей сучасної комунікації, а саме: сленгу, смайлів, які можуть знижувати або підвищувати показник ризику, позначення типу «+1» повинні мати позитивні властивості. Щодо структури текстів, то варто дослідити вплив довжини коментарю на значення результуючого показника.

Оскільки назва ризику задачі формується зі слів, що наявні в коментарях, маємо релевантні результати, проте можна дослідити зміну відображення назви у разі зміни кількості тем і топ-N для врахування.

Якщо такі інструменти використовуватимуться в реальних проектах, потрібно автоматизувати вибір оптимальних параметрів за замовчуванням. Утім вони можуть установлюватися менеджером у налаштуваннях так само, як періодичність оновлення моделі новими коментарями.

Якщо надати користувачам інструмент для перейменування ризиків з ключових слів, можна використовувати моделі для генерування більш природних назв.

Оскільки одна задача може містити декілька ризиків, то виокремити їх з розмови розробників — інше складне завдання, яке потребує дослідження.

## **ВИСНОВКИ**

У ході дослідження вивчено джерела для визначення актуального напрямку розвитку роботи та методів, що використовуються в даній сфері. На основі отриманої інформації створено огляд літератури, складено методологію роботи, розроблено інструменти для її використання і проведено експерименти для перевірки адекватності методу.

Для експерименту використовувалися коментарі відкритого жігасховища Apache, потім токенизувались, лематизувалися і для кожного з них обчислювалися характеристики VAD. Імовірність появи ризиків у задачі розраховується як середнє інтегроване зважене значення цих показників, де вагами є актуальність коментарю. У результаті коментарі з більш яскравим емоційним забарвленням дійсно мають великі показники, що може слугувати сигналом для менеджерів щодо завчасного реагування. Варто також проаналізувати сучасні комунікаційні компоненти (сленгові слова, смайли, скорочення, терміни) для отримання більш точних результатів. Новим виміром можна обрати показник сентиментальності коментарю та розглянути інші фреймворки визначення емоцій.

Запропоновано підхід для визначення назви потенційних ризиків задачі з її коментарів на основі побудови моделі LDA та використання отриманих коефіцієнтів для побудови хмари слів. Доцільно зробити акцент на автоматизацію обрання оптимальних параметрів (кількість тем та слів, що формують тему), які можуть змінюватися від проекту до проекту.

Виконано маркетинговий аналіз потенційного продукту, що може бути створений на основі запропонованої методології. З результатів опитування випливає, що майбутній додаток має містити базовий функціонал та реєстр ризиків, що може зробити його більш привабливим для можливих користувачів. Чим більше користувачів і даних, тим краще уявлення про ризики у розробленні програмних продуктів, що дає перспективи для швидшого виявлення ризиків та можливого усунення. Застосування аналізу часових рядів для обраних показників може допомогти передбачати проблеми за змінами у листуванні, а можливо і навіть з назви задачі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *PMI. Success Rates Rise 2017 9th Global Project Management Survey. Pulse of the Profession*, 2017. Available: <https://www.pmi.org/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession2017.pdf>.
2. A. Murgia, P. Tourani, B. Adams, and M. Ortu, *Do Developers Feel Emotions? An Exploratory Analysis of Emotions in Software Artifacts*, 2014. Available: <https://alessandromurgia.files.wordpress.com/2014/03/emotionanalysis.pdf>.
3. *The Top 20 Most Popular Project Management Software*, 2018. Available: <https://www.capterra.com/project-management-software/#infographic>.
4. *System Dashboard*. Available: <https://issues.apache.org/jira/secure/Dashboard.jspa>.
5. *Teamwork. Right tools, right people, and right practices*. Available: <https://www.atlassian.com/teamwork>.
6. R. Colomo-Palacios, C. Casado-Lumbreras, P. Soto-Acosta, and A. García-Crespo, *Using the Affect Grid to Measure Emotions in Software Requirements Engineering*, 2011. Available: [http://www.jucs.org/jucs\\_17\\_9/using\\_the\\_affect\\_grid/jucs\\_17\\_09\\_1281\\_1298\\_colomo.pdf](http://www.jucs.org/jucs_17_9/using_the_affect_grid/jucs_17_09_1281_1298_colomo.pdf).
7. L. Jun, *Human factors in agile software development*, 2015. Available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1502/1502.04170.pdf>.
8. M. Ortu et al., *The JIRA Repository Dataset: Understanding Social Aspects of Software Development*, 2015. Available: [http://mcis.polymtl.ca/publications/2015/ortu\\_promise.pdf](http://mcis.polymtl.ca/publications/2015/ortu_promise.pdf).
9. R. Jongeling, P. Sarkar, S. Datta, and A. Serebrenik, *On negative results when using sentiment analysis tools for software engineering research*, 2017. Available: <https://doi.org/10.1007/s10664-016-9493-x>.
10. M. Mäntylä et al., *Mining Valence, Arousal, and Dominance – Possibilities for Detecting Burnout and Productivity?*, 2016. Available: <https://arxiv.org/pdf/1603.04287.pdf>.
11. M. Ortu et al., “Arsonists or Firefighters? Affectiveness in Agile Software Development”, *Lecture Notes in Business Information Processing*, issue 251, 2016.
12. A.B. Warriner, V. Kuperman, and M. Brysbaert, *Norms of valence, arousal, and dominance for 13,915 English lemmas. Behavior Research Methods*, 2013. Available: <https://doi.org/10.37>.
13. T. Hofmann, *Probabilistic latent semantic indexing*, 1999. Available: [https://www.researchgate.net/publication/2941307\\_Probabilistic\\_Latent\\_Semantic\\_Indexing](https://www.researchgate.net/publication/2941307_Probabilistic_Latent_Semantic_Indexing).
14. D. Blei, A. Ng, and M. Jordan, *Latent Dirichlet Allocation*, 2003. Available: <http://www.jmlr.org/papers/volume3/blei03a/blei03a.pdf>.
15. E. Guzman, *Visualizing emotions in software development projects*, 2013. Available: <https://doi.org/10.1109/VISSOFT.2013.6650529>.
16. D. Hoffman, M. Blei, and B. Francis, *Online Learning for Latent Dirichlet Allocation*, 2010. Available: <https://www.di.ens.fr/~fbach/mdhnips2010.pdf>.
17. M. Röder, A. Both, and A. Hinneburg, *Exploring the Space of Topic Coherence Measures*, 2015. Available: [https://svn.aksw.org/papers/2015/WSDM\\_Topic\\_Evaluation/public.pdf](https://svn.aksw.org/papers/2015/WSDM_Topic_Evaluation/public.pdf).
18. D. Mimno et al., *Optimizing semantic coherence in topic models*, 2011. Available: [http://dirichlet.net/pdf/mimno11\\_optimizing.pdf](http://dirichlet.net/pdf/mimno11_optimizing.pdf).
19. *jira-social-repository*. Available: <https://github.com/marcoortu/jira-social-repository>.

Надійшла 31.01.2020

### INFORMATION ON THE ARTICLE

**A.A. Liednikova**, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: anna.liednikova@gmail.com.

**D.V. Shypik**, ORCID: 0000-0002-7667-4701, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: shypikd@gmail.com.

**P.I. Bidyuk**, ORCID: 0000-0002-7421-3565, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: pbidyuke\_00@ukr.net.

### PROJECT RISK ANALYSIS USING TEXT DATA MINING OF COMMENTS IN PROJECT MANAGEMENT SYSTEM JIRA / A.A. Liednikova, D.V. Shypik, P.I. Bidyuk

**Abstract.** During the study, a methodology was developed, and a software product was developed for project risk assessment based on developer communications, as well as the results of the program work on the data of the real project CASSANDRA of Apache Software Foundation. The methodology is implemented based on already well-known algorithms for determining the emotional components in the text of the VAD and matrix methods for project risk analysis using their developments that allow combining these different approaches. Obtaining the names of potential risks is performed using the model of constructing the LDA themes. The results allow us to determine the importance of the task by the communications and rank them in the middle of the project by the importance and need for additional attention that will allow project managers to understand and solve problems more quickly in the context of the product.

**Keywords:** project risk analysis, probabilistic latent semantic analysis, latent Dirichlet allocation model, natural language processing, sentiment analysis.

### АНАЛИЗ РИСКОВ ПРОЕКТА С ПОМОЩЬЮ ТЕКСТОВОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ КОММЕНТАРИЕВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ JIRA / А.А. Ледникова, Д.В. Шипик, П.И. Бидюк

**Аннотация.** В ходе исследования разработана методология и создан программный продукт для определения рисков проекта на базе коммуникации разработчиков, а также представлены результаты работы программы на данных реального проекта CASSANDRA компании Apache Software Foundation. Методология реализована на основе уже известных алгоритмов определения эмоциональных составляющих в тексте VAD и матричных методов анализа рисков проекта с использованием собственных разработок, позволяя соединить эти разные подходы. Название потенциальных рисков определяется с помощью модели построения тем LDA. Полученные результаты позволяют определять важность задачи в соответствии с коммуникаций и ранжировать их в середине проекта по важности и необходимости дополнительного внимания, что в контексте продукта позволит менеджерам проекта более быстро понимать и решать проблемы.

**Ключевые слова:** анализ рисков проекта, вероятностный латентный семантический анализ, модель латентного распределения Дирихле, обработка природного языка, анализ тональности текста.

### REFERENCES

1. *PMI. Success Rates Rise 2017 9th Global Project Management Survey. Pulse of the Profession*, 2017. Available: <https://www.pmi.org/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession2017.pdf>.
2. A. Murgia, P. Tourani, B. Adams, and M. Ortu, *Do Developers Feel Emotions? An Exploratory Analysis of Emotions in Software Artifacts*, 2014. Available: <https://alessandromurgia.files.wordpress.com/2014/03/emotionanalysis.pdf>.

3. *The Top 20 Most Popular Project Management Software*, 2018. Available: <https://www.capterra.com/project-managementsoftware/#infographic>.
4. *System Dashboard*. Available: <https://issues.apache.org/jira/secure/Dashboard.jspa>.
5. *Teamwork. Right tools, right people, and right practices*. Available: <https://www.atlassian.com/teamwork>.
6. R.Colomo-Palacios, C. Casado-Lumbreras, P. Soto-Acosta, and A. García-Crespo, *Using the Affect Grid to Measure Emotions in Software Requirements Engineering*, 2011. Available: [http://www.jucs.org/jucs\\_17\\_9/using\\_the\\_affect\\_grid/jucs\\_17\\_09\\_1281\\_1298\\_colomo.pdf](http://www.jucs.org/jucs_17_9/using_the_affect_grid/jucs_17_09_1281_1298_colomo.pdf).
7. L. Jun, *Human factors in agile software development*, 2015. Available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1502/1502.04170.pdf>.
8. M. Ortu et al., *The JIRA Repository Dataset: Understanding Social Aspects of Software Development*, 2015. Available: [http://mcis.polymtl.ca/publications/2015/ortu\\_promise.pdf](http://mcis.polymtl.ca/publications/2015/ortu_promise.pdf).
9. R. Jongeling, P. Sarkar, S. Datta, and A. Serebrenik, *On negative results when using sentiment analysis tools for software engineering research*, 2017. Available: <https://doi.org/10.1007/s10664-016-9493-x>.
10. M. Mäntylä et al., *Mining Valence, Arousal, and Dominance – Possibilities for Detecting Burnout and Productivity?*, 2016. Available: <https://arxiv.org/pdf/1603.04287.pdf>.
11. M. Ortu et al., “Arsonists or Firefighters? Affectiveness in Agile Software Development”, *Lecture Notes in Business Information Processing*, issue 251, 2016.
12. A.B. Warriner, V. Kuperman, and M. Brysbaert, *Norms of valence, arousal, and dominance for 13,915 English lemmas. Behavior Research Methods*, 2013. Available: <https://doi.org/10.37>.
13. T. Hofmann, *Probabilistic latent semantic indexing*, 1999. Available: [https://www.researchgate.net/publication/2941307\\_Probabilistic\\_Latent\\_Semantic\\_Indexing](https://www.researchgate.net/publication/2941307_Probabilistic_Latent_Semantic_Indexing).
14. D. Blei, A. Ng, and M. Jordan, *Latent Dirichlet Allocation*, 2003. Available: <http://www.jmlr.org/papers/volume3/blei03a/blei03a.pdf>.
15. E. Guzman, *Visualizing emotions in software development projects*, 2013. Available: <https://doi.org/10.1109/VISSOFT.2013.6650529>.
16. D. Hoffman, M. Blei, and B. Francis, *Online Learning for Latent Dirichlet Allocation*, 2010. Available: <https://www.di.ens.fr/~fbach/mdhnips2010.pdf>.
17. M. Röder, A. Both, and A. Hinneburg, *Exploring the Space of Topic Coherence Measures*, 2015. Available: [https://svn.aksw.org/papers/2015/WSDM\\_Topic\\_Evaluation/public.pdf](https://svn.aksw.org/papers/2015/WSDM_Topic_Evaluation/public.pdf).
18. D. Mimno et al., *Optimizing semantic coherence in topic models*, 2011. Available: [http://dirichlet.net/pdf/mimno11\\_optimizing.pdf](http://dirichlet.net/pdf/mimno11_optimizing.pdf).
19. *jira-social-repository*. Available: <https://github.com/marcoortu/jira-social-repository>.



**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ  
В ОРТОТРОПНОМУ ЕЛЕКТРОПРУЖНОМУ ПРОСТОРИ  
З ДОВІЛЬНО ОРІЄНТОВАНОЮ СФЕРОЇДАЛЬНОЮ  
ПОРОЖНИНОЮ (ПІД ВНУТРІШНІМ ТИСКОМ)**

**В.С. КИРИЛЮК, О.І. ЛЕВЧУК, О.В. ГАВРИЛЕНКО,  
М.Б. ВІТЕР, Л.В. ХАРИТОНОВА**

**Анотація.** На основі математичного моделювання досліджено напружений стан ортотропного електропружного простору з довільно орієнтованою сфероїдальною порожниною під внутрішнім тиском. Розв'язок задачі отримано за допомогою використання узагальненого на випадок ортотропного п'єзоелектричного матеріалу методу еквівалентного включення Ешелбі та інтегрального подання функції Гріна для анізотропного електропружного простору. Тестування алгоритму розв'язання задачі виконано на частинному випадку (для трансверсально-ізотропного електропружного матеріалу зі сфероїдальною порожниною) підтверджує його ефективність. Проведено числові дослідження напруженого стану в ортотропному електропружному матеріалі з порожниною під внутрішнім тиском, виявлено характерні закономірності розподілу напружень.

**Ключові слова:** математичне моделювання, ортотропний п'єзоелектричний матеріал, сфероїдальна порожнина, довільна орієнтація, зв'язана система рівнянь електропружності, внутрішній тиск, напружений стан.

**ВСТУП**

Останнім часом значно зріс інтерес до вивчення зв'язаних полів у електропружних тілах, про що свідчить суттєве збільшення кількості публікацій у цій галузі [1–10]. Праці [1, 4, 6, 8–16] присвячені пошуку електричного та напруженого станів п'єзоелектричних тіл з концентраторами напружень. Ряд важливих результатів для п'єзоелектричних тіл отримано у працях [11, 17, 18]. Для форми порожнини або включення у вигляді сфероїда (еліпсоїда обертання), розташованого у трансверсально-ізотропному електропружному просторі, точний розв'язок задачі отримано лише у випадку, коли вісь обертання концентратора напружень орієнтована вздовж осі симетрії матеріалу [11, 14–16]. Для ортотропного електропружного матеріалу, що містить тріщину круглої або еліптичної форми, розташовану в одній з площин симетрії матеріалу, для деяких типів навантажень у [19, 20] отримано аналітично-числовий розв'язок, для шаруватого ортотропного електропружного матері-

алу при згині задача досліджувалась у праці [21]. Розв'язок задачі про тривісне еліпсоїдальне включення в ортотропному електропружному просторі при розтязі знайдено у праці [22].

У роботі вперше розглянуто задачу про ортотропний п'єзоелектричний простір, що містить довільно орієнтовану сфероїдальну порожнину під сталим внутрішнім тиском. Під час розгляду припускається, що нормальна складова вектора електричної індукції на поверхні порожнини дорівнює нулю. Це відповідає відсутності електричних навантажень на поверхні порожнини, на якій немає електродного покриття. Також вважається, що у п'єзоелектричному ортотропному матеріалі відсутні зовнішні силові та електричні навантаження.

Для розв'язання задачі математичного моделювання використано підхід, який базується на методі еквівалентного включення Ешелбі (узагальненому на випадок ортотропного електропружного матеріалу). Під час виконання обчислень поверхневі інтеграли, що розглядаються у ході розв'язання задачі, обчислюються за допомогою квадратурних формул Гаусса. Алгоритм розв'язання задачі апробовано на частинному випадку — для трансверсально-ізотропного електропружного матеріалу зі сферичною порожниною, вісь обертання якої збігається з віссю симетрії матеріалу (задача має точний розв'язок). Порівняння результатів досліджень у частинних випадках з даними інших авторів праць [11, 15] підтверджує ефективність використаного підходу.

Досліджено розподіл напружень у ортотропному електропружному просторі з довільним чином орієнтованою сфероїдальною порожниною (під внутрішнім тиском) за її різних геометричних параметрів.

## ОСНОВНІ РІВНЯННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай ортотропний електропружний простір містить довільно орієнтовану сфероїдальну порожнину (з півосями  $a_1 = a_2, a_3$ ), поверхня якої перебуває під внутрішнім тиском  $P_0$ . Процес деформування електропружного матеріалу для зв'язаних силових та електричних полів описується такою системою рівнянь:

рівняння рівноваги за відсутності об'ємних сил

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad (1)$$

рівняння електростатики

$$D_{i,i} = 0; \quad E_i = -\Psi_{,i}; \quad (2)$$

співвідношення Коші

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i});$$

рівняння стану

$$\sigma_{ij} = C_{ijmn}\varepsilon_{mn} + e_{nij}\Psi_{,n}; \quad D_i = e_{imn}\varepsilon_{mn} - k_{in}\Psi_{,n}, \quad (3)$$

де  $\sigma_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ij}$ ,  $u_i$ ,  $D_i$ ,  $E_i$ ,  $\Psi$  — компоненти напружень, деформацій, переміщень, електричних переміщень (індукції), напруженості електричного поля

та електричний потенціал відповідно. Система рівнянь (1)–(3) є повною системою зв'язаних рівнянь електропружності. Уведемо такі позначення тензорів:  $C_{ijmn}$ ,  $e_{imn}$ ,  $k_{ij}$  — пружні модулі, п'єзомодулі, діелектричні проникності.

Перший з цих тензорів вимірюється за сталого значення електричного поля, а два останні — за сталої деформації. Для п'єзоелектричних тіл, які є ортотропними за пружними та електричними властивостями, пружні властивості характеризуються дев'ятьма незалежними сталими  $c_{11}, c_{22}, c_{33}, c_{12}, c_{13}, c_{23}, c_{44}, c_{55}, c_{66}$ , п'єзомодулі — п'ятьма сталими  $e_{15}, e_{24}, e_{31}, e_{31}, e_{33}$ , діелектричні проникності — трьома незалежними сталими  $k_{11}, k_{22}, k_{33}$ . Компоненти введених тензорів пов'язані з відповідними незалежними сталими таким чином:

$$\begin{aligned} C_{1111} &= c_{11}; C_{2222} = c_{22}; C_{3333} = c_{33}; C_{1122} = C_{2211} = c_{12}; \\ C_{1133} &= C_{3311} = c_{13}; C_{2233} = C_{3322} = c_{23}; C_{2323} = C_{2332} = C_{3232} = C_{3223} = c_{44}; \\ C_{3131} &= C_{3113} = C_{1331} = C_{1313} = c_{55}; C_{1212} = C_{1221} = C_{2121} = C_{2112} = c_{66}; \quad (4) \\ e_{113} &= e_{131} = e_{15}; e_{223} = e_{232} = e_{24}; e_{311} = e_{31}; e_{322} = e_{32}; e_{333} = e_{33}; \\ &k_{11}; k_{22}; k_{33}. \end{aligned}$$

Не наведені у формулах (4) компоненти трьох тензорів набувають нульових значень.

Для дослідження задачі зручно ввести нову систему координат, у якій одна з осей збігається з віссю обертання сфероїдальної порожнини. Вважаємо, що вихідна система координат  $Oxuz$  пов'язана з новою (локальною) системою  $Ox^1y^1z^1$  таким чином, що нову систему можна отримати з вихідної системи за допомогою обертання навколо осі  $Ox$  на кут  $\alpha$  (рис. 1). Тоді тензори пружних модулів, п'єзомодулів і діелектричних сталей у новій системі координат дістаємо за допомогою перетворень тензорів відповідних порядків:

$$C_{ijkl}^{\alpha} = C_{mnpk} \alpha_{im} \alpha_{jn} \alpha_{kp} \alpha_{lq}, \quad e_{ijk}^{\alpha} = e_{mnp} \alpha_{im} \alpha_{jn} \alpha_{kp}, \quad k_{ij}^{\alpha} = k_{mn} \alpha_{im} \alpha_{jn},$$

де  $\alpha_{ij}$  — матриця перетворення вигляду

$$\alpha_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}.$$

Довільну орієнтацію сфероїдальної порожнини можна отримати послідовним обертанням на кути  $\alpha, \beta, \gamma$  навколо осей старої системи координат  $Ox, Oy, Oz$  відповідно. Знаходимо матрицю перетворення  $T_{ij}$ :

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & \sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}.$$

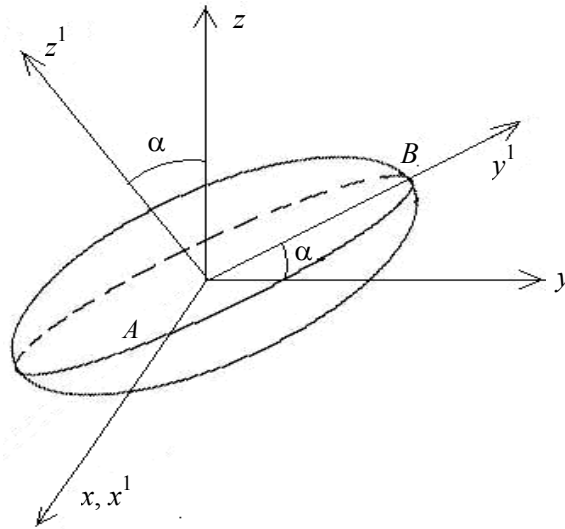


Рис. 1. Орієнтація сфероїдальної порожнини за обертання навколо осі  $Ox$  на кут  $\alpha$

Матриця є результатом послідовного перемноження трьох матриць, що відображають праві обертання навколо кожної з осей координат:

$$\alpha_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}; \beta_{ij} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 0 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}; \gamma_{ij} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тоді нові тензори пружних модулів, п'єзomodулів і діелектричних сталей  $C_{ijkl}^{(\alpha,\beta,\gamma)}$ ,  $e_{ijk}^{(\alpha,\beta,\gamma)}$ ,  $k_{ij}^{(\alpha,\beta,\gamma)}$  отримаємо за допомогою перетворень тензорів відповідних порядків:

$$C_{ijkl}^{(\alpha,\beta,\gamma)} = C_{mnpq} T_{im} T_{jn} T_{kp} T_{lq}; e_{ijk}^{(\alpha,\beta,\gamma)} = e_{mnp} T_{im} T_{jn} T_{kp}; k_{ij}^{(\alpha,\beta,\gamma)} = k_{mn} T_{im} T_{jn},$$

де за індексами, що повторюються, виконується підсумовування. Надалі використовується традиційний тензорний запис. Відзначимо, що нічого не змінюючи у схемі розв'язання задачі, замість перетворення  $T_{ij}$ , зумовленого обертанням навколо трьох осей координат, можна вводити інше перетворення, наприклад, на основі кутів Ейлера.

Для опису електричного і напруженого станів використаємо більш уніфіковані позначення [13]. У результаті маємо

пружні переміщення та електричний потенціал

$$U_M = \begin{cases} u_m, & M = 1, 2, 3, \\ \Psi, & M = 4; \end{cases} \quad (5)$$

пружні деформації та напруженості електричного поля

$$Z_{Mn} = \begin{cases} \varepsilon_{mn}, & M = 1, 2, 3, \\ \Psi_{,n}, & M = 4; \end{cases} \quad (6)$$

напруження та електричні переміщення (індукцію)

$$\Sigma_{iJ} = \begin{cases} \sigma_{ij}, & J = 1, 2, 3, \\ D_i, & J = 4; \end{cases} \quad (7)$$

електропружні модулі

$$E_{iJMn}^{(\alpha,\beta,\gamma)} = \begin{cases} C_{ijmn}^{(\alpha,\beta,\gamma)}, & J, M = 1, 2, 3; \\ e_{nij}^{(\alpha,\beta,\gamma)}, & J = 1, 2, 3; M = 4; \\ e_{imn}^{(\alpha,\beta,\gamma)}, & J = 4; M = 1, 2, 3; \\ -k_{in}^{(\alpha,\beta,\gamma)}, & J, M = 4. \end{cases} \quad (8)$$

За допомогою формул (5)–(8) рівняння стану (3) можна отримати у вигляді

$$\Sigma_{iJ} = E_{iJMn}^{(\alpha,\beta,\gamma)} Z_{Mn}, \quad (9)$$

де у лівій частині рівняння (9) використано позначення (7).

### МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ

Сама схема розгляду задачі на основі методу Ешелбі така. Спочатку розглядається тривісний розтяг  $\sigma_{11}^0 = \sigma_{22}^0 = \sigma_{33}^0 = P_0$  (за відсутності вектора електричної індукції основного поля) в ортотропному п'єзоелектричному просторі зі сфероїдальною порожниною. Електропружні властивості включення покладаються близькими до нульових значень (моделюється порожнина). Далі на основі узагальненого методу еквівалентного включення Ешелбі обчислюються силове і електричне поля, які є суперпозицією основного поля (тривісний розтяг) і збуреного стану (викликаного наявністю порожнини). Після цього із суперпозиції станів (основного і збуреного) віднімається тривісний розтяг (основний напружений стан). У результаті отримуємо тільки збурений стан, що відповідає навантаженню порожнини внутрішнім тиском.

Електричний і напружений стани у п'єзоелектричному просторі подамо суперпозицією основного поля і збурення, викликаного наявністю порожнини. Для пошуку збуреного стану скористаємося методом еквівалентного включення Ешелбі, узагальненим на випадок електропружності [13]. Рівняння еквівалентності в області включення (неоднорідності) мають такий вигляд:

$$E_{iJKl}^{1(\alpha,\beta,\gamma)} (Z_{Kl}^0 + Z_{Kl}) = E_{iJKl}^{(\alpha,\beta,\gamma)} (Z_{Kl}^0 + Z_{Kl} - Z_{Kl}^*) \quad (\bar{x} \in \Omega), \quad (10)$$

де  $E_{iJKl}^{1(\alpha,\beta,\gamma)}$ ,  $E_{iJKl}^{(\alpha,\beta,\gamma)}$  — електропружні модулі неоднорідності та матриці відповідно (для випадку порожнини  $E_{iJKl}^{1(\alpha,\beta,\gamma)}$  спрямуємо до близьких до нуля значень);  $Z_{Mn}^*$  — значення «вільних» деформацій (за термінологією Ешелбі) і напруженості електричного поля, які визначаються з умов еквівалентності включення. Значення  $Z_{Kl}^0$  (деформації і значення електричної індукції основного поля) отримуємо зі співвідношень  $\Sigma_{iJ}^0 = E_{iJKl}^{(\alpha,\beta,\gamma)} Z_{Kl}^0$ . Аналогічно пружному випадку маємо

$$Z_{Mn} = S_{MnAb}^{(\alpha,\beta,\gamma)} Z_{Ab}^*, \quad (11)$$

де  $S_{MnAb}^{(\alpha,\beta,\gamma)}$  — п'єзоелектричний аналог тензора Ешелбі, який залежить від геометричної форми включення і електропружних властивостей п'єзоелектричного простору. Скориставшись Фур'є-образом функції Гріна для нескінченного електропружного матеріалу, подамо його у вигляді

$$S_{MnAb}^{(\alpha,\beta,\gamma)} = \frac{E_{iJAb}^{(\alpha,\beta,\gamma)}}{4\pi} \begin{cases} \frac{1}{2} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} [I_{mJin}(\bar{z}) + I_{nJim}(\bar{z})] d\theta d\eta_3, & m = M = 1, 2, 3; \\ \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} [I_{4Jin}(\bar{z})] d\theta d\eta_3, & M = 4, \end{cases} \quad (12)$$

де  $z_i = \eta_i / a_i$ ;  $\eta_1 = \sqrt{1 - \eta_3^2} \cos \theta$ ;  $\eta_2 = \sqrt{1 - \eta_3^2} \sin \theta$ . Крім цього, маємо  $K_{MJ} = z_i z_n E_{iMJn}^{(\alpha,\beta,\gamma)}$ .

За допомогою співвідношень (10)–(12) для знаходження невідомих значень  $Z_{Kl}^*$  отримуємо систему лінійних алгебричних рівнянь. Коефіцієнти цієї системи залежать від подвійних інтегралів типу (12), які не мають особливостей в області інтегрування.

Для знаходження розподілу напружень у електропружному просторі з еліпсоїдальним включенням потрібно спочатку за формулами (12) обчислити аналог тензора Ешелбі  $S_{MnAb}^{(\alpha,\beta,\gamma)}$ , а потім з рівнянь еквівалентності (10) визначити значення  $Z_{Kl}^*$ . У роботі компоненти  $S_{MnAb}^{(\alpha,\beta,\gamma)}$  обчислювались за квадратурними формулами Гаусса. Після знаходження невідомих значень  $Z_{Kl}^*$  визначався електричний та напружений стани в середині м'якого включення. Для обчислення значень напружень та характеристик електричного поля у точках п'єзоелектричного простору, що межують з поверхнею включення, використовувались формули для стрибка напружень та електричної індукції при переході через межу включення [13]:

$$[\Sigma_{iJ}] = \Sigma_{iJ}^{out} - \Sigma_{iJ}^{in} = E_{iJKl}^{(\alpha,\beta,\gamma)} \{ -E_{pQMn}^{(\alpha,\beta,\gamma)} Z_{Mn}^* n_p n_l K_{QK}^{-1}(\bar{n}) + Z_{Kl}^* \}, \quad (13)$$

де  $n_i$  — компоненти нормалі до поверхні включення.

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЛОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Спочатку для тестування алгоритму розв'язання задачі розглянемо випадок сфероїдальної порожнини, що міститься у трансверсально-ізотропному електропружному просторі. Припускаємо, що вісь обертання сфероїда збігається з віссю симетрії п'єзоелектричного матеріалу  $Oz$ . Нехай основний електричний та напружений стани у нескінченному електропружному просторі мають вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x^0; \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0; \\ \Psi^{(0)} &= 0; D_x^{(0)} = D_y^{(0)} = 0; D_z^{(0)} = d_{31} \sigma_x^0, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $d_{31}$  — п'єзоелектрична стала [17]. Розглянемо п'єзокерамічні матеріали РХЕ-5 і ЦТС-19, властивості яких наведено у праці [17]. Після обчислень для стиснутої сфероїдальної порожнини отримуємо результати, що узгоджуються з даними праці [15] (отримані криві накладаються на лінії рис. 1, 2 із праці [15]). Для діапазону співвідношень півосей сфероїда  $c/a = 0,2 \div 0,9$  у розрахунках використовувались квадратурні формули Гаусса за 48 вузлами (за кожною зі змінних), а для діапазону співвідношень  $c/a = 0,1 \div 0,2$  — за 96 вузлами. Знайдені в результаті обчислень значення напружень узгоджуються з даними праці [15]. Так, концентрація напружень  $\sigma_x / \sigma_x^0$  за заданого основного поля (14) і співвідношення півосей сфероїда  $c/a = 0,5$  для п'єзокерамічного матеріалу ЦТС-19 на поверхні порожнини досягає значень 1,418 (1,42 у праці [15]) у вершині сфероїдальної порожнини на осі  $Oy$  і 1,887 (1,89 у праці [15]) у вершині на осі  $Oz$ .

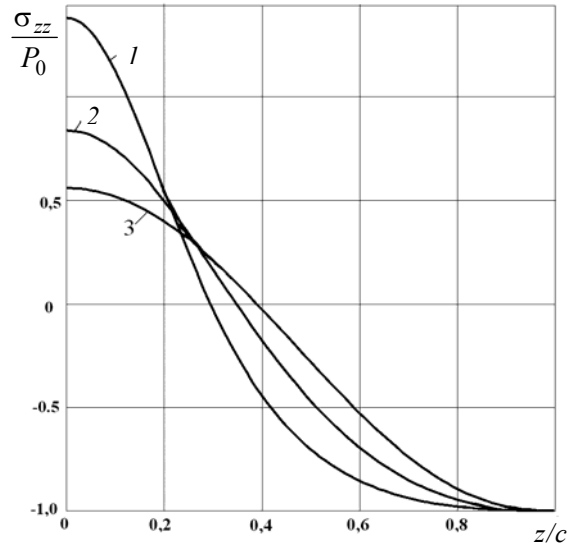
Отже, тестування підходу на задачі для трансверсально-ізотропного п'єзоелектричного простору зі сфероїдальною порожниною, яка має точний розв'язок, підтверджує узгодженість результатів досліджень з даними інших авторів.

Проведемо дослідження напруженого стану в ортотропному електропружному матеріалі  $Ba_2NaNb_5O_{15}$  з довільно орієнтованою сфероїдальною порожниною під внутрішнім тиском (за відсутності електричних впливів на поверхні порожнини  $D_z = 0$ ) і за відсутності основних силових і електричних полів у електропружному матеріалі. Відзначимо, що властивості матеріалу  $Ba_2NaNb_5O_{15}$  характеризуються значеннями 17 незалежних електропружних сталих, значення яких наведено у праці [18].

Спочатку розглянемо випадок спеціальної орієнтації стиснутої сфероїдальної порожнини, коли її вісь обертання збігається з віссю  $Oz$  (однією з головних осей симетрії ортотропного електропружного матеріалу), а дві інші осі ортотропії п'єзоелектричного матеріалу збігаються з осями  $Oy$  і  $Oz$  (рис. 1). Розподіл напружень  $\sigma_{zz} / P_0$  уздовж поверхні порожнини у перерізі  $XZ$  (від вершини сфероїда на осі  $Ox$  до його вершини на осі  $Oz$ ) за різних співвідношень півосей порожнини зображено на рис. 2, на якому криві 1, 2, 3 відповідають таким співвідношенням півосей сфероїдальної порожнини:  $a/c = 0,5; 0,7; 0,9$ . Видно, що зі зменшенням значень  $a/c$  (збільшенням кривизни сфероїдальної поверхні) зростають максимальні значення напружень  $\sigma_{zz} / P_0$  (на поверхні порожнини у вершині сфероїда на осі  $Ox$ ). Водночас у вершині  $C$  (на осі  $Oz$ )  $\sigma_{zz} / P_0 = -1$ , що відповідає граничним умовам перебування порожнини під тиском  $P_0$ .

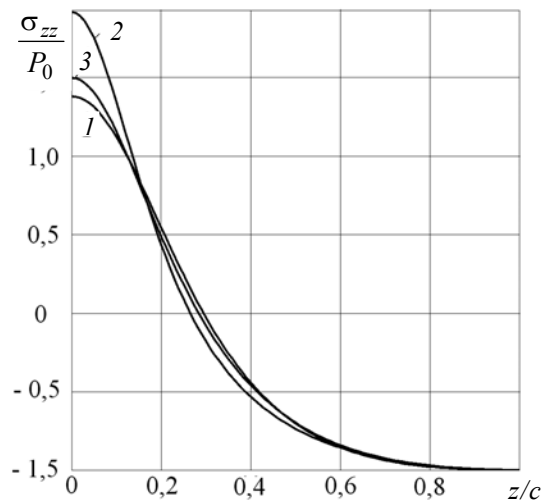
Розподіл напружень уздовж поверхні порожнини у перерізі  $xz$  для трьох матеріалів з різними властивостями (за попередньої орієнтації осей обертання) за співвідношення півосей сфероїдальної порожнини  $a/c = 0,6$  зображено на рис. 3, на якому крива 1 відповідає електропружному ортотропному матеріалу  $Ba_2NaNb_5O_{15}$ , лінії 2 і 3 — пружним ортотропним матеріалам СТЕТ і АСТТ [23, с. 66]. Найбільші значення напружень виникають для пружного ортотропного матеріалу СТЕТ, а найменші значення макси-

мальних напружень маємо для електропружного ортотропного матеріалу  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ .



*Рис. 2.* Розподіл напружень уздовж поверхні порожнини у перерізі  $xz$  (за спеціальної орієнтації порожнини)

Розподіл напружень у перерізі  $xz$  для чотирьох різних орієнтацій стиснутої сфероїдальної порожнини у матеріалі  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  зображено на рис. 4, на якому лінії 1, 2, 3, 4 відповідають випадкам обертання стиснутої сфероїдальної порожнини навколо осі  $Ox$  (див. рис. 1) на кути  $\alpha = 0, \pi/6, \pi/3, \pi/2$ . Видно, що найменше значення напружень досягається за  $\alpha = 0$  (вісь обертання стиснутого сфероїда направлена вздовж однієї з осей ортотропії п'єзоелектричного матеріалу), найбільше – за  $\alpha = \pi/2$ .



*Рис. 3.* Розподіл напружень у перерізі  $xz$  (уздовж поверхні порожнини) для трьох різних матеріалів



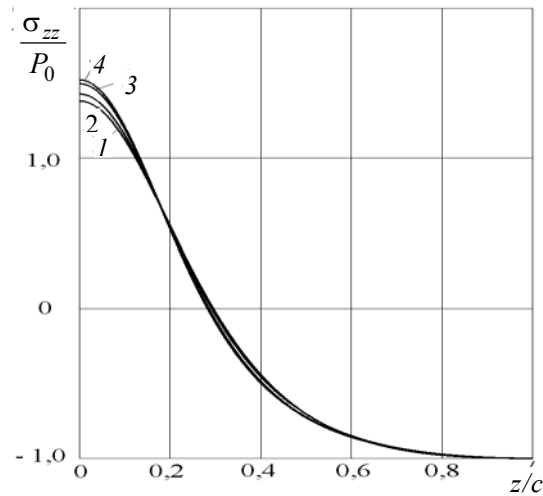


Рис. 4. Вплив орієнтації порожнини на розподіл напружень

## ВИСНОВКИ

За допомогою математичної моделі досліджено розподіл напруженого стану в ортотропному п'єзоелектричному матеріалі, що містить довільно орієнтовану порожнину сфероїдальної форми, яка перебуває під внутрішнім тиском. Вивчено вплив електропружних властивостей ортотропного матеріалу, геометрії порожнини і її орієнтації на розподіл напружень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. F. Dinartz and H. Sabar, "Electroelastic ellipsoidal inclusion with imperfect interface and its application to piezoelectric composite materials", *Int. J. Solids and Struct.*, vol. 136–137, pp. 241–249, 2018.
2. C. Hwu, W.-R. Chen, and T.-H. Lo, "Green's function of anisotropic elastic solids with piezoelectric or magneto-electro-elastic inclusions", *Int. J. Fracture*, vol. 215, no. 1–2, pp. 91–103, 2019.
3. G. Iovane and A. V. Nasedkin, "Numerical modelling of two-phase piezocomposites with interface mechanical anisotropic effects", *Advanced Structured Materials*, vol. 103, pp. 293–304, 2019.
4. S.A. Kaloerov and E.S. Glushankov, "Determining the Thermo-Electro-Magneto-Elastic State of Multiply Connected Piecewise-Homogeneous Piezoelectric Plates", *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 59, no. 6, pp. 1036–1048, 2018.
5. H.B. Li, Y.D. Li, and X. Wang, "Effects of inclusion on the creep rate of piezoelectric films", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 26, no. 4, pp. 300–306, 2019.
6. V.V. Loboda, A.G. Kryvoruchko, and A.Y. Sheveleva, "Electrically plane and mechanically antiplane problem for an inclusion with stepwise rigidity between piezoelectric materials", *Advanced Structured Materials*, vol. 94, pp. 463–481, 2019.
7. G. Martínez-Ayuso, M.I. Friswell, H. Khodaparast Haddad, J.I. Roscow, and C.R. Bowen, "Electric field distribution in porous piezoelectric materials during polarization", *Acta Materialia*, vol. 173, pp. 332–341, 2019.

8. X. Peng, M. Yu, and Y. Yang, “Interaction between a generalized screw dislocation in the matrix and an inhomogeneity containing an elliptic hole in piezoelectric–piezomagnetic composite materials”, *Mathematics and Mechanics of Solids*, vol. 24, no. 10, pp. 3080–3091, 2019
9. J. Shi and A.H. Akbarzadeh, “Architected cellular piezoelectric metamaterials: Thermo-electro-mechanical properties”, *Acta Materialia*, vol. 163, pp. 91–121, 2019.
10. Y. Solyaev and S. Lurie, “Numerical predictions for the effective size-dependent properties of piezoelectric composites with spherical inclusions”, *Composite Structures*, vol. 202, pp. 1099–1108, 2018.
11. Yu.N. Podil’chuk, “Exact Analytical Solutions of Static Electroelastic and Thermo-electroelastic Problems for a Transversely Isotropic Body in Curvilinear Coordinate Systems”, *Int. Appl. Mech.*, vol. 39, no. 2, pp. 132 – 170, 2003.
12. L. Dai, W. Guo, and X. Wang, “Stress concentration at an elliptic hole in transversely isotropic piezoelectric solids”, *Int. J. Solids and Struct.*, vol. 43, no. 6, pp. 1818–1831, 2006.
13. M.L. Dunn and M. Taya, “Electroelastic Field Concentrations In and Around Inhomogeneities In Piezoelectric Solids”, *J. Appl. Mech.*, vol. 61, no. 4, pp. 474– 475, 1994.
14. Y. Mikata, “Explicit determination of piezoelectric Eshelby tensors for a spheroidal inclusion”, *Int. J. Solids and Struct.*, vol. 38, no. 40–41, pp. 7045–7063, 2001.
15. Yu.N. Podil’chuk and I.G. Myasoedova, “Stress State of a Transversely Isotropic Piezoceramic Body with Spheroidal Cavity”, *Int. Appl. Mech.*, vol. 40, no. 11, pp. 1269–1280, 2004.
16. C.R. Chiang and G.J. Weng, “The nature of stress and electric-displacement concentrations around a strongly oblate cavity in a transversely isotropic piezoelectric material”, *Int. J. Fract.*, vol. 134, no. 3–4, pp. 319–337, 2005.
17. В.Т. Гринченко, А.Ф. Улитко, и Н.А. Шульга, “Электроупругость”, *Механика связанных полей в элементах конструкций: в 6-ти т.*, т. 1. Киев: Наукова думка, 1989.
18. М.О. Шульга и В.Л. Карлаш, *Резонансні електромеханічні коливання п’єзоелектричних пластин*. Київ: Наукова думка, 2008.
19. V.S. Kirilyuk, O.I. Levchuk, and H. Altenbach, “Calculation of Stress Intensity Factors for an Arbitrary Oriented Penny-shaped Crack Under Inner Pressure in an Orthotropic Electroelastic Material”, *Advanced Structured Materials*, vol. 108, pp. 211–222, 2019.
20. V.S. Kirilyuk and O.I. Levchuk, “Stress State of an Orthotropic Piezoelectric Material with an Elliptic Crack”, *Int. Appl. Mech.*, vol. 53, no. 3, pp. 305–312, 2017.
21. Y.Y. Zhou, W.Q. Chen, and C.F. Lu, “Semi-analytical solution for orthotropic piezoelectric laminates in cylindrical bending with interfacial imperfections”, *Composite Structures*, vol. 92, no. 4, pp. 1009–1018, 2010.
22. V.S. Kirilyuk and O.I. Levchuk, “Stress State of an Orthotropic Piezoelectric Body with a Triaxial Ellipsoidal Inclusion Subject to Tension”, *Int. Appl. Mech.*, vol. 55, no. 3, pp. 305–310, 2019.
23. S.G. Lekhnitskii, *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*. Moscow: Mir, 1981.

*Надійшла 11.12.2019*

#### INFORMATION ON THE ARTICLE

**V.S. Kirilyuk**, ORCID: 0000-0002-8513-0378, S.P. Timoshenko Institute of mechanics of NAS of Ukraine, e-mail: kirilyuk\_v@ukr.net.

**O.I. Levchuk**, ORCID: 0000-0002-6514-6225, S.P. Timoshenko Institute of mechanics of NAS of Ukraine, e-mail: 2013levchuk@gmail.com.

**O.V. Gavrilenko**, ORCID: 0000-0003-0413-6274, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: iem.gavrilenko@meta.ua.

**M.B. Viter**, ORCID: 0000-0003-4109-005X, National Transport University of Ukraine, e-mail: mbviter@gmail.com

**L.V. Kharytonova**, ORCID: 0000-0002-0108-6702, National Transport University of Ukraine, e-mail: kharytonova-lv@ukr.net.

**MATHEMATICAL MODELING OF THE STRESS STATE IN AN ORTHOTROPIC ELECTROELASTIC SPACE WITH AN ARBITRARY ORIENTED SPHEROIDAL CAVITY UNDER INTERNAL PRESSURE** / V.S. Kirilyuk, O.I. Levchuk, O.V. Gavrilenko, M.B. Viter, L.V. Kharytonova

**Abstract.** The stress state of an orthotropic electro-elastic space with an arbitrary oriented spheroidal cavity under internal pressure is investigated based on mathematical modeling. The problem's solution is obtained by using the Eshelby equivalent method, generalized to the case of orthotropic piezoelectric material, and the integral representation of the Green function for an anisotropic electroelastic space. Testing the algorithm for solving the problem on a special case (for a transversely isotropic electrical-elastic material with a spheroidal cavity) confirms its effectiveness. The numerical studies of the stress state in an orthotropic electroelastic material with a cavity under internal pressure were carried out, characteristic patterns of stress distribution were revealed.

**Keywords:** mathematical modeling, orthotropic piezoelectric material, coupled system of equations of electroelasticity, spheroidal cavity, arbitrary orientation, inner pressure, stress state.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОРТОТРОПНОМ ЭЛЕКТРОУПРУГОМ ПРОСТРАНСТВЕ С ПРОИЗВОЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННОЙ СФЕРОИДАЛЬНОЙ ПОЛОСТЬЮ (ПОД ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ)** / В.С. Кирилук, О.И. Левчук, Е.В. Гавриленко, М.Б. Витер, Л.В. Харитонова

**Аннотация.** На основе математического моделирования исследовано напряженное состояние ортотропного электроупругого пространства с произвольно ориентированной сфероидальной полостью под внутренним давлением. Решение задачи получено с помощью использования обобщенного на случай ортотропного пьезоэлектрического материала метода эквивалентного включения Эшелби и интегрального представления функции Грина для анизотропного электроупругого пространства. Тестирование алгоритма решения задачи на частном случае, для которого существует точное решение, и подтверждает его эффективность. Проведены численные исследования напряженного состояния в ортотропном электроупругом материале с полостью под внутренним давлением, выявлены характерные закономерности распределения напряжений.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, ортотропный пьезоэлектрический материал, связанная система уравнений электроупругости, сфероидальная полость, произвольная ориентация, внутреннее давление, напряженное состояние.

## REFERENCES

1. F. Dinzart and H. Sabar, "Electroelastic ellipsoidal inclusion with imperfect interface and its application to piezoelectric composite materials", *Int. J. Solids and Struct.*, vol. 136–137, pp. 241–249, 2018.
2. C. Hwu, W.-R. Chen, and T.-H. Lo, "Green's function of anisotropic elastic solids with piezoelectric or magneto-electro-elastic inclusions", *Int. J. Fracture*, vol. 215, no. 1–2, pp. 91–103, 2019.
3. G. Iovane and A. V. Nasedkin, "Numerical modelling of two-phase piezocomposites with interface mechanical anisotropic effects", *Advanced Structured Materials*, vol. 103, pp. 293–304, 2019.
4. S.A. Kaloerov and E.S. Glushankov, "Determining the Thermo-Electro-Magneto-Elastic State of Multiply Connected Piecewise-Homogeneous Piezoelectric Plates", *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 59, no. 6, pp. 1036–1048, 2018.

5. H.B. Li, Y.D. Li, and X. Wang, “Effects of inclusion on the creep rate of piezoelectric films”, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 26, no. 4, pp. 300–306, 2019.
6. V.V. Loboda, A.G. Kryvoruchko, and A.Y. Sheveleva, “Electrically plane and mechanically antiplane problem for an inclusion with stepwise rigidity between piezoelectric materials”, *Advanced Structured Materials*, vol. 94, pp. 463–481, 2019.
7. G. Martínez-Ayuso, M.I. Friswell, H. Khodaparast Haddad, J.I. Roscow, and C.R. Bowen, “Electric field distribution in porous piezoelectric materials during polarization”, *Acta Materialia*, vol. 173, pp. 332–341, 2019.
8. X. Peng, M. Yu, and Y. Yang, “Interaction between a generalized screw dislocation in the matrix and an inhomogeneity containing an elliptic hole in piezoelectric–piezomagnetic composite materials”, *Mathematics and Mechanics of Solids*, vol. 24, no. 10, pp. 3080–3091, 2019.
9. J. Shi and A.H. Akbarzadeh, “Architected cellular piezoelectric metamaterials: Thermo-electro-mechanical properties”, *Acta Materialia*, vol. 163, pp. 91–121, 2019.
10. Y. Solyaev and S. Lurie, “Numerical predictions for the effective size-dependent properties of piezoelectric composites with spherical inclusions”, *Composite Structures*, vol. 202, pp. 1099–1108, 2018.
11. Yu.N. Podil’chuk, “Exact Analytical Solutions of Static Electroelastic and Thermoelastic Problems for a Transversely Isotropic Body in Curvilinear Coordinate Systems”, *Int. Appl. Mech.*, vol. 39, no. 2, pp. 132 – 170, 2003.
12. L. Dai, W. Guo, and X. Wang, “Stress concentration at an elliptic hole in transversely isotropic piezoelectric solids”, *Int. J. Solids and Struct.*, vol. 43, no. 6, pp. 1818–1831, 2006.
13. M.L. Dunn and M. Taya, “Electroelastic Field Concentrations In and Around Inhomogeneities In Piezoelectric Solids”, *J. Appl. Mech.*, vol. 61, no. 4, pp. 474– 475, 1994.
14. Y. Mikata, “Explicit determination of piezoelectric Eshelby tensors for a spheroidal inclusion”, *Int. J. Solids and Struct.*, vol. 38, no. 40–41, pp. 7045–7063, 2001.
15. Yu.N. Podil’chuk and I.G. Myasoedova, “Stress State of a Transversely Isotropic Piezoceramic Body with Spheroidal Cavity”, *Int. Appl. Mech.*, vol. 40, no. 11, pp. 1269–1280, 2004.
16. C.R. Chiang and G.J. Weng, “The nature of stress and electric-displacement concentrations around a strongly oblate cavity in a transversely isotropic piezoelectric material”, *Int. J. Fract.*, vol. 134, no. 3–4, pp. 319–337, 2005.
17. V.T. Grinchenko, A.F. Ulitko, and N.A. Shulga, “Electroelasticity”, *Mechanics of coupled fields in structural elements: in 6 volumes.*, vol. 1. Kyiv: Naukova Dumka, 1989.
18. M.O. Shulga and V.L. Karlash, *Resonant electromechanical vibrations of plates*. Kyiv: Naukova Dumka, 2008.
19. V.S. Kirilyuk, O.I. Levchuk, and H. Altenbach, “Calculation of Stress Intensity Factors for an Arbitrary Oriented Penny-shaped Crack Under Inner Pressure in an Orthotropic Electroelastic Material”, *Advanced Structured Materials*, vol. 108, pp. 211–222, 2019.
20. V.S. Kirilyuk and O.I. Levchuk, “Stress State of an Orthotropic Piezoelectric Material with an Elliptic Crack”, *Int. Appl. Mech.*, vol. 53, no. 3, pp. 305–312, 2017.
21. Y.Y. Zhou, W.Q. Chen, and C.F. Lu, “Semi-analytical solution for orthotropic piezoelectric laminates in cylindrical bending with interfacial imperfections”, *Composite Structures*, vol. 92, no. 4, pp. 1009–1018, 2010.
22. V.S. Kirilyuk and O.I. Levchuk, “Stress State of an Orthotropic Piezoelectric Body with a Triaxial Ellipsoidal Inclusion Subject to Tension”, *Int. Appl. Mech.*, vol. 55, no. 3, pp. 305–310, 2019.
23. S.G. Lekhnitskii, *Theory of Elasticity of an Anisotropic Body*. Moscow: Mir, 1981.

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Безпалько Олександр Сергійович,**

магістр кафедри технічної кібернетики КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Бідюк Петро Іванович,**

професор, доктор технічних наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Вігер Михайло Богданович,**

доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних систем та технологій факультету транспортних та інформаційних технологій Національного транспортного університету, Україна, Київ

**Гавриленко Олена Валеріївна,**

доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління факультету інформатики та обчислювальної техніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Зайченко Олена Юріївна,**

доцент, доктор технічних наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Зайченко Юрій Петрович,**

професор, доктор технічних наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Зубрецька Наталія Анатоліївна,**

професор, доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних систем і технологій Національного транспортного університету, Україна, Київ

**Кирилюк Віталій Семенович,**

старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник відділу механіки стохастично-неоднорідних середовищ Інституту механіки імені С.П.Тимошенка НАН України, Київ

**Кислий Роман Володимирович,**

асистент кафедри системного проектування ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Коршевнік Лев Олександрович,**

кандидат технічних наук, докторант ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, старший викладач Уманського державного педагогічного університету імені Павла Тичини, Україна, Київ

**Криваковська Регіна Володимирівна,**

програміст «Mama Products» Ltd., Україна, Київ

**Кузнєцова Наталія Володимирівна,**

доктор технічних наук, доцент кафедри математичних методів системного аналізу ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Левчук Ольга Іванівна,**

старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу механіки стохастично-неоднорідних середовищ Інституту механіки імені С.П.Тимошенка НАН України, Київ

**Лєднікова Анна Андріївна,**

науковий магістр ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Петренко Анатолій Іванович,**

професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри системного проектування ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Федін Сергій Сергійович,**

професор, доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних систем і технологій Національного транспортного університету, Україна, Київ

**Федоровський Олександр Дмитрович,**

член-кореспондент НАН України, професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу системного аналізу Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

**Харитонова Леся Василівна,**

доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних систем і технологій факультету транспортних та інформаційних технологій Національного транспортного університету, Україна, Київ

**Хижняк Анна Василівна,**

кандидат технічних наук, науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

**Черниш Злата Святославівна,**

бакалавр ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Шипік Данило Володимирович,**

аспірант ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ