

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ТЕХНОЛОГІЇ  
ТА  
ІНЖИНІРИНГ

№ 4(21), 2024

DOI:10.30857/2786-5371.2024.4

Наукове фахове видання

Періодичність виходу: 6 разів на рік

Дата заснування: грудень 1999 р.

*Київ 2024*

**Засновником видання «Технології та інжиніринг» є**

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ**

Науковий фаховий журнал є правонаступником видання «Вісник Київського національного університету технологій та дизайну», який у свою чергу був правонаступником видання «Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности», який видавався з березня 1958 року у Київському технологічному інституті легкої промисловості (СРСР).

**№ 4(21), 2024**

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації: серія КВ №24822–14762 ПР від 19.04.2021р.

Журнал зареєстровано як суб'єкт у сфері друкованих медіа – ідентифікатор R30-05423 (Рішення Національної Ради від 08.08.2024 р. №2520).

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 993 від 24.07.2002 р.

**Журнал входить до переліку наукових фахових видань України.** Наказ МОН України від 29.06.2021 №735 (додаток 3).

Категорія Б. Технічні науки. Спеціальності: 122, 131, 133, 151, 161, 132, 182, 141, 144, 171 (2018, 2020).

**ISSN 2786-5371 print**  
**ISSN 2786-538X online**

Журнал зареєстровано в Міжнародному центрі періодичних видань (ISSN International Centre, Париж, Франція)

Журнал реферується та індексується у наступних міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, Index Copernicus, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

**Засновник і видавець:**

Київський національний університет технологій та дизайну  
Україна, 01011, м. Київ, вул. Мала Шияновська, 2

**Головний редактор:**

**Панасюк І.В.,** д.т.н., професор

**Заступник  
головного редактора:**

**Злотенко Б. М.,** д.т.н., професор

**Відповідальний  
секретар:**

**Кривонос О. О.**

Тематична спрямованість журналу «Технології та інжиніринг»: Інформаційні технології, електроніка, механічна та електрична інженерія. Матеріалознавство індустрії моди, технологій виробництва текстилю, одягу та взуття. Хімічні та біофармацевтичні технології.

Видання орієнтоване на науковців, викладачів, аспірантів, студентів, а також науково-практичних працівників і фахівців відповідних галузей промисловості.

**АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:**

01011, м. Київ, вул. Мала Шияновська, 2, корп. 1, к. 1-347

тел./факс: +38 (044) 256-21-39

e-mail: [vistnuk@knu.edu.ua](mailto:vistnuk@knu.edu.ua); <http://vistnyk.knu.edu.ua/>

**Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету технологій та дизайну, протокол № 2 від 25.09.2024 р.**

Матеріали друкуються мовою оригіналу. Відповідальність за переклад, достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв, назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей. Передруки та переклади статей дозволяються лише за згодою автора (-ів) та редакції.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

**TECHNOLOGIES  
AND  
ENGINEERING**

**Issue 4(21), 2024**

**DOI:10.30857/2786-5371.2024.4**

Scientific Specialized Edition

Issued: 6 times a year

Founded: December, 1999

*Kyiv 2024*

**The owner of «Technologies and Engineering» is**

**KYIV NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGIES AND DESIGN**

This Scientific Specialized Journal is the successor of the edition "Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design", which in turn was the legal successor of the edition «Proceedings of Higher educational establishments. Technology of the light industry», which was published by Kiev Technological Institute of Light Industry from March, 1958 (USSR).

*№ 4(21), 2024*

The state registration of print media is KB № 24822-14762 ПП, originating date 19.04.2021

The magazine is registered as an entity in the field of print media – identifier R30-05423 (Decision of the National Council dated August 8, 2024 No. 2520).

License for publishing activity is ДК №993, originating date 24.07.2002  
The journal is listed & reregistered in Higher Attestation Commission of Ukraine: №735 dated 29.06.2021 “Technologies and Engineering” in the list of professional publications: cat. B, technical specialties – 122, 131, 133, 151, 161, 132, 182, 141, 144, 171 (from 2018, 2020).

---

**ISSN 2786-5371 print**  
**ISSN 2786-538X online**

The journal is registered in ISSN International Centre, Paris.

The journal is abstracted and indexed by Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, Index Copernicus, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

---

**Owner and Publisher:**

Kyiv National University of Technologies and Design  
Ukraine, 01011, Kyiv, 2, Mala Shyianovska Str.

---

**Editor-in- Chief:**

**Igor V. Panasiuk** - Dr., professor

**Deputy Editor:**

**Borys M. Zlotenko** - Dr., professor

**Executive secretary:**

**Olena O. Kryvonos**

---

Scientific fields: Information technologies, electronics, mechanical and electrical engineering. Material science in the textile, clothing and footwear manufacturing industries. Chemical and biopharmaceutical technologies.

The journal is aimed at a wide range of researchers, professors, students, and graduate students and to bring the results of scientific research carried out under a variety of intellectual traditions and organizations of procedures to the attention of a specialized readership.

**EDITORIAL OFFICE:**

01011, Ukraine, Kyiv, 2, Mala Shyianovska Str., office 1-347

Tel./fax: +38 (044) 256-21-39

e-mail: [vistnuk@knutd.edu.ua](mailto:vistnuk@knutd.edu.ua); <http://vistnyk.knutd.edu.ua/>

---

**Recommendations from Science Council of Kyiv National University of Technologies and Design, Protocol № 2, originating date 25.09.2024.**

---

Articles are published in the original language. The authors are responsible for the translation, authenticity of facts, quotations, proper names, geographic names, names of enterprises and other information.

The Editorial Office's and author's consent is needed prior to republishing or translating the articles.

**ВІДОМОСТІ ПРО ЧЛЕНІВ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ  
наукового фахового журналу  
«ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ»  
"TECHNOLOGIES AND ENGINEERING"**

**Панасюк Ігор Васильович** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *головний редактор* (Scopus Author ID: 56672850100, Researcher ID: D-4255-2017, ORCID: 0000-0001-6671-4266).

**Злотенко Борис Миколайович** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник головного редактора* (Scopus Author ID: 57196146994, ORCID: 0000-0002-0870-8535).

**СЕКЦІЯ: ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕЛЕКТРОНІКА,  
МЕХАНІЧНА ТА ЕЛЕКТРИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ**

**Шведчикова Ірина Олексіївна** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*. ORCID: 0000-0003-3005-7385.

**Стаценко Володимир Володимирович** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*. ORCID: 0000-0002-3932-792X.

**Білоус Інна Юріївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-6640-103x.

**Денисюк Сергій Петрович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-2134-254X.

**Жуйков Валерій Якович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-3338-2426.

**Мілих Володимир Іванович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна. ORCID: 0000-0002-6176-3103.

**Ніконов Олег Якович** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-8878-4318.

**Осипенко Володимир Васильович** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, 0000-0002-1077-1461.

**Стаценко Дмитро Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-3064-3109.

**Суходуб Ірина Олегівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». ORCID: 0000-0002-5895-1306.

**Чорний Олексій Петрович** – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна. ORCID: 0000-0001-8270-3284.

**Шавьолкін Олександр Олексійович** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0003-3914-0812.

**Andrzej Borusiewicz** – D.Sc., Associate Professor, International University of Applied Sciences in Lomza, Poland, ORCID: 0000-0002-1407-7530.

**Jasim Mohmed** – Docent, PhD, Al-Furat Al-Awsat Technical University – Al-Musssaib Technical college, Kufa, Iraq. ORCID: 0000-0002-2983-416X.

**Juraj Gerlici** – Prof., Dr. Ing., University of Žilina, Slovak Republic. ORCID: 0000-0003-3928-0567.

**Kateryna Kravchenko** – PhD, University of Žilina, Slovak Republic. ORCID: 0000-0002-3775-6288.

**Kay Berkling** – Prof. Ph.D., Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW), Mosbach, Germany. ORCID: 0000-0003-1186-5678.

**Mirosław Skibniewski** – Prof., Ph.D., Dr.h.c., Honor. Prof., Department of Civil & Environmental Engineering A. James Clark School of Engineering University of Maryland, College Park, USA, ORCID: 0000-0002-7102-753X.

## СЕКЦІЯ: МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ІНДУСТРІЇ МОДИ, ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЮ, ОДЯГУ ТА ВЗУТТЯ

**Галавська Людмила Євгеніївна** – доктор технічних наук, професор, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*. ORCID: 0000-0002-6994-6641.

**Арабулі Світлана Іванівна** – кандидат технічних наук, доцент, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*. ORCID 0000-0003-1049-8255.

**Гараніна Ольга Олександрівна** – доктор технічних наук, професор, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-4715-3851.

**Кизимчук Олена Павлівна** – доктор технічних наук, професор, Дрезденський технічний університет, Німеччина. ORCID: 0000-0002-8874-8931.

**Очеретна Лариса** – PhD, доцент, Ліберецький технічний університет, Чеська республіка. ORCID: 0000-0003-4296-410X.

**Первая Наталія Володимирівна** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-5086-3926.

**Редько Яна Володимирівна** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0001-7284-6898.

**Славінська Алла Людвигівна** – доктор технічних наук, професор, Хмельницький національний університет, Україна. ORCID: 0000-0003-0663-9422.

## СЕКЦІЯ: ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

**Плаван Вікторія Петрівна** – доктор технічних наук, професор, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*. ORCID: 0000-0001-9559-8962.

**Мокроусова Олена Романівна** – доктор технічних наук, професор, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*. ORCID: 0000-0003-1943-8048.

**Андрєва Ольга Адіславівна** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0001-8374-2306.

**Бессарабов Володимир Іванович** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0003-0637-1729.

**Іщенко Олена Володимирівна** – доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-9510-6005.

**Кузьмінський Євген Васильович** – доктор хімічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-5632-8297.

**Левицький Володимир Євстахович** – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Україна. ORCID: 0000-0003-1323-1943.

**Савченко Богдан Михайлович** – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-8636-5734.

**Скорохода Володимир Йосипович** – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Україна. ORCID: 0000-0002-2352-5964.

**Страшний Владислав Володимирович** – доктор фармацевтичних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-9188-1821.

**Хоменко Володимир Григорович** – доктор технічних наук, доцент, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0003-0013-8010.

**Valeika Virgilijus** – professor, PhD, Department of Physical and Inorganic Chemistry, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania. ORCID: 0000-0003-4974-7626.

## ЗМІСТ

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕЛЕКТРОНІКА, МЕХАНІЧНА ТА ЕЛЕКТРИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

- 1 **Андрієнко О. В.**  
УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ НА ОСНОВІ  
ТРИГОНОМЕТРИЧНОГО БАЗИСА 9
- 2 **Голінко В. В., Недоснований О. Ю.**  
ПОКРАЩЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБРОБКИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ  
ДАНИХ ТЕХНОЛОГІЄЮ НЕЙРОМЕРЕЖІ 19
- 3 **Гула В. С., Грига В. М.**  
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СЕНСОРІВ ДЛЯ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ НАВИГАЦІЇ  
БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ 29
- 4 **Корогод Г. О., Яхно В. М.**  
АЛГОРИТМ ТА КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ  
ВИСОКОТОЧНОГО ЗНАЧЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ВЕЛИЧИНИ ТА  
МЕТРОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ 48
- 5 **Латишев Я.-В. Г., Мосиса А. А.**  
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЖЕСТИВ ТА РУХІВ У VR ВЕБ-  
ПРОСТОРІ 59
- 6 **Мосиса А. А., Латишев Я.-В. Г.**  
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ  
ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ  
ПРОДУКТИВНОСТІ В МОБІЛЬНИХ ГРАФІЧНИХ ДОДАТКАХ 67
- 7 **Посвістак В. С., Мірошніченко Д. В.**  
ВИКОРИСТАННЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ВІДДАЛЕНОГО  
КЕРУВАННЯ ДРОНОМ 73
- 8 Трофименко О. Г., Соколов А. В., Чикунов П. О.,  
Ахмамєтьєва Г. В., Манаков С. Ю.  
ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ВІЙСЬКОВІЙ КІБЕРСФЕРІ 85

### ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- 9 **Лісовий В. М., Бессарабов В. І.**  
АНТИОКСИДАНТНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДОЇ ДИСПЕРСНОЇ СИСТЕМИ  
ГЕСПЕРИДИНУ, ОТРИМАНОЇ МЕТОДОМ ВІДЦЕНТРОВОГО  
ФОРМУВАННЯ ВОЛОКОН 93
- 10 **Плаван В. П., Колодій А. І., Охмат О. А., Бойченко А. Ю., Латишев Д. О.**  
ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ПОЛІМЕРНИХ ДИСПЕРСІЙ ДЛЯ  
ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЇ ПОВЕРХНІ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ 102
- 11 **Сабєрова В. О., Тамаркіна Ю. В., Редько А. В., Кучеренко В. О.**  
АДСОРБЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОПОРИСТИХ ВУГЛЕЦЕВИХ  
МАТЕРІАЛІВ, ОТРИМАНИХ ЛУЖНОЮ АКТИВАЦІЄЮ З ТЕПЛОВИМ  
УДАРОМ 111
- 12 **Шведчикова І. О., Панасюк І. В., Солошич І. О., Малий Я. С.**  
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЛИВНИХ  
ЕЛЕМЕНТІВ ЯК ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ  
ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ТРАНСПОРТУ 125

## TABLE OF CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGIES, ELECTRONICS, MECHANICAL AND ELECTRICAL ENGINEERING

- 1 **Andrienko O. V.**  
A GENERALIZED MODEL OF THE GLOW DISCHARGE BASED ON THE TRIGONOMETRIC BASIS 9
- 2 **Golinko V. V., Nedosnovanyi O. Y.**  
IMPROVEMENT OF AUTOMATION OF GEOINFORMATION DATA PROCESSING USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGY 19
- 3 **Hula V. S., Hryha V. M.**  
ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF THE ART OF SENSORS FOR INERTIAL NAVIGATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES 29
- 4 **Korohod H. O., Yakhno V. M.**  
ALGORITHM AND COMPUTER PROGRAM FOR DETERMINATION OF HIGH PRECISION VALUE OF MEASUREMENT AND METROLOGICAL CONTROL 48
- 5 **Latyshev Ya.-V. H., Mosisa A. A.**  
RESEARCH ON GESTURE AND MOTION SYNCHRONIZATION TOOLS IN VR-WEB SPACE 59
- 6 **Mosisa A. A., Latyshev Ya.-V. H.**  
COMPARATIVE ANALYSIS OF USING GEOMETRIC TRANSFORMATION ALGORITHMS TO IMPROVE PERFORMANCE IN MOBILE APPLICATIONS 67
- 7 **Posvistak V. S., Miroshnychenko D. V.**  
USAGE OF MOBILE NETWORK FOR REMOTE DRONE 73
- 8 **Trofymenko O. G., Sokolov A. V., Chykunov P. O., Akhmametiyeva H. V., Manakov S. Yu.**  
AI IN THE MILITARY CYBER DOMAIN 85

### CHEMICAL AND BIOPHARMACEUTICAL TECHNOLOGIES

- 9 **Lisovyi V. M., Bessarabov V. I.**  
ANTIOXIDANT PROPERTIES OF SOLID DISPERSED SYSTEM OF HESPERIDIN OBTAINED BY CENTRIFUGAL FIBER FORMATION 93
- 10 **Plavan V. P., Kolodiy A. I., Okhmat O. A., Boychenko A. Yu., Latishev D. O.**  
COMPARATIVE EVALUATION OF THE POLYMER DISPERSIONS FOR THE FIBROUS MATERIALS SURFACE FUNCTIONALIZATION 102
- 11 **Sabierova V. O., Tamarkina Yu. V., Redko A. V., Kucherenko V. O.**  
ADSORPTION PROPERTIES OF NANOPOROUS CARBON MATERIALS OBTAINED BY ALKALINE ACTIVATION WITH THERMAL SHOCK 111
- 12 **Shvedchykova I. O., Panasiuk I. V., Soloshych I. O., Malyi Ya. S.**  
RESEARCH OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF FUEL ELEMENTS AS A POWER SOURCE FOR THE INNOVATIVE DEVELOPMENT OF ENVIRONMENTALLY SAFE TRANSPORT 125

УДК 537.525

АНДРІЄНКО О. В.

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

## УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ НА ОСНОВІ ТРИГОНОМЕТРИЧНОГО БАЗИСА

**Мета:** полягає в огляді та класифікації існуючих на даний момент моделей тліючого розряду за методом математичного опису процесів, тиску, типу газу та за геометрією електродів. Стаття спрямована на створення узагальненої моделі розряду, яка визначатиме вплив кожного параметру на характеристики розряду.

**Методика:** Для досягнення цілей дослідження були використані методи теоретичного аналізу наукових джерел, а також математичний метод для опису узагальненої моделі розряду на базі ортонормованого базису, зокрема тригонометричного базису.

**Результати:** Проведено огляд тліючого розряду, запропоновано класифікацію моделей за аналітичними методами в їх основі. Виокремлено вектор параметрів спільний для всіх моделей. Також при аналізі було проведено порівняння характеристик моделей у вигляді таблиці. Була запропонована узагальнена модель дослідження газових розрядів методом варіації параметрів за допомогою ортонормованих базисів. Як приклад наведено формування вектору змінних параметрів у тригонометричному базисі.

**Наукова новизна:** Стаття пропонує узагальнену модель розряду, яка оснований на істотній зміні кожного параметру як компоненти вектору ортонормованого базису, що впливає на характеристики розряду. Така модель дозволяє одночасно змінювати параметри моделі, накопичувати реакції на зміни параметрів у кожному випробуванні, а по завершенні за результатами аналізу виокремити вплив кожного параметру при сукупній зміні параметрів моделі а також окремо і вплив комбінацій змін параметрів.

**Практична значимість:** Модель дозволяє аналізувати вплив різних параметрів на розряд незалежно від конкретних умов експерименту. Використання ортонормованого базису для представлення параметрів дозволяє виявляти, які параметри мають найбільший вплив на стабільність і ефективність розряду як окремо, так і в комбінації з іншими параметрами. Це дає можливість оптимізувати ці параметри для досягнення найкращих результатів в конкретних умовах, що робить її універсальним інструментом для дослідників і інженерів, що полегшує аналіз взаємозв'язків між параметрами і дозволяє отримати більш повну картину поведінки системи.

**Ключові слова:** тліючий розряд; моделювання; метод Монте-Карло; гідродинамічні моделі; кінетичні моделі; гібридні моделі; ортонормований базис; швидке перетворення Фур'є.

**Вступ.** Газові розряди, зокрема тліючі газові розряди, є фундаментальним явищем, яке має широке застосування в різних галузях науки і техніки, зокрема в промислових плазмових процесах, медицині, мікроелектроніці та освітлювальних технологіях. Вивчення та моделювання цих розрядів є важливим для розуміння їх фізичних властивостей і поведінки під різними умовами. Моделювання газових розрядів дозволяє дослідникам і інженерам прогнозувати ефекти та оптимізувати параметри для конкретних прикладних завдань, таких як плазмове травлення, плазмо-хімічне травлення у виготовленні інтегральних мікросхем, очищення газів або створення нових джерел світла.

Актуальність моделювання газових розрядів обумовлена необхідністю підвищення точності та ефективності різних технологічних процесів. У зв'язку з цим розробка, адаптація до конкретних умов та впровадження нових методів моделювання, які можуть забезпечити прийнятне відтворення фізичних процесів і зменшення обчислювальних витрат, є надзвичайно важливими для наукового прогресу та технологічного розвитку.

На сьогоднішній день існує значна кількість досліджень, присвячених різним аспектам моделювання газових розрядів. Серед них варто відзначити роботи, що використовують гідродинамічні моделі, дрейфово-дифузні моделі та методи Монте-Карло. Ці методи дозволяють моделювати різні фізичні процеси в газових розрядах, такі як зіткнення частинок, іонізація та рекомбінація. Проте, незважаючи на значні досягнення в цій галузі, багато аспектів залишаються невирішеними. Зокрема, питання оптимізації моделей для підвищення точності та зменшення обчислювальних витрат, аналізу впливу конкретних параметрів на характеристики розряду, а також адаптація моделей для складних геометрій та умов залишаються актуальними.

**Постановка завдання.** Метою даної статті є всебічний аналіз сучасних методів моделювання тліючого розряду. Зокрема, стаття спрямована на порівняння характеристик, обчислювальних витрат цих моделей, а також створення узагальненої моделі, яка дозволяє прогнозувати зміну характеристик розряду при зміні одного або декількох параметрів, що є важливим для контролю процесу в реальних застосуваннях та забезпечить можливість швидко налаштувати параметри процесу для досягнення бажаних характеристик плазми.

**Основні методи моделювання.** У моделюванні тліючих розрядів на цей час існує декілька видів моделей [1]:

- Гідродинамічна модель описує плазму як континуум, використовуючи макроскопічні рівняння, такі як рівняння Нав'є-Стокса, рівняння енергії, рівняння неперервності. На сьогоднішній день гідродинамічний підхід найчастіше застосовується для моделювання плазмових тліючих розрядів. Він базується на уявленні про плазму як про континуум, що дозволяє описувати її поведінку на макроскопічному рівні за допомогою рівнянь, які визначають густину, швидкість та температуру заряджених частинок у розряді. Гідродинамічні моделі добре підходять для швидкого отримання результатів, задовільно працює в несильному полі та при низьких тисках, але їх точність недостатня для моделювання складних плазмових систем. Детально можливості та обмеження гідродинамічних моделей описані в [2].

- Кінетичні моделі описують поведінку частинок на мікроскопічному рівні. Основою є функція розподілу частинок у фазовому просторі. До таких методів належать рівняння Больцмана, метод Монте-Карло, метод частинок у комірках (Particle-in-Cell, PiC). Модель за методом Монте-Карло використовується для моделювання плазми в умовах, де необхідно детально враховувати кінетичні процеси. Вона особливо корисна для аналізу нестационарних явищ, а також для розрахунку властивостей плазми при низьких та середніх тисках, де важливі кінетичні ефекти і нелокальний транспорт електронів. Ця модель застосовується для широкого діапазону напруг, зокрема для розрядів з відносно низькою напругою, де розподіл енергії електронів значно відрізняється від теплового, а також в складних геометричних конфігураціях. З розвитком обчислювальних технологій метод Монте-Карло стає все більш популярним. Він широко використовується для моделювання процесів руху та зіткнень частинок у прикатодному шарі тліючого розряду за наявності відомих даних про електричне поле. Модель за методом Монте-Карло часто поєднують з іншими моделями, такими як частинка в комірці (PiC). Комбінація є ефективною, оскільки метод PiC обчислює електричне поле, але не враховує зіткнення частинок, тоді як метод Монте-Карло моделює рух, зіткнення і втрати енергії частинок, проте не займається розрахунком електричного поля.

- Модель на основі метода дрейфово-дифузного наближення із розв'язанням рівнянь Больцмана поєднує макроскопічний підхід до опису руху заряджених частинок з розв'язанням кінетичних рівнянь, що дозволяє враховувати складні фізичні процеси на різних масштабах. Модель підходить для низькотемпературних плазмових розрядів, таких як тліючий розряд. Вона дозволяє точно описувати просторовий розподіл плазми та її параметрів, особливо у

випадках, коли середній вільний пробіг електронів порівняний з характерними розмірами системи.

• Гібридна модель може мати, наприклад, комбінації рідинних та кінетичних моделей. Вони часто надають більш точні результати порівняно з окремо взятими гідродинамічною чи кінетичною моделлю, але потребують більше обчислювальних ресурсів. Гібридні моделі тліючого розряду дозволяють досягти високої точності та ефективності завдяки поєднанню різних підходів.

Вибір конкретної моделі залежить від завдань дослідження та доступних обчислювальних ресурсів. У табл. 1 наведено класифікацію моделей газових розрядів, їх переваги та недоліки.

**Аналіз сучасних досліджень.** На сьогоднішній день найбільш поширеним методом моделювання тліючого розряду є гібридний підхід, який поєднує кінетичні моделі та гідродинамічні моделі. Огляд та класифікацію сучасних моделей наведено в табл. 2.

Таблиця 1

**Класифікація моделей газових розрядів**

Модель	Короткий опис	Переваги	Недоліки
Гідродинамічна	Гідродинамічна модель (або макроскопічна модель) використовується для опису поведінки плазми на основі макроскопічних величин, таких як густина, швидкість і температура частинок. Базується на рівняннях збереження маси, імпульсу та енергії.	Відносно швидка і проста у реалізації для багатьох задач.	Менш точна для опису мікроскопічних процесів. Вимагає припущень щодо термодинамічної рівноваги, тому малопридатна у випадку нерівноважних процесів
Дрейфово-дифузна з розв'язанням рівнянь Больцмана	Дрейфово-дифузна модель базується на рівняннях Больцмана та використовується для опису поведінки заряджених частинок у полі. Вона враховує як дрейф частинок під дією електричного поля, так і їх дифузію внаслідок теплового руху.	Точніший опис мікроскопічних процесів. Висока точність у прогнозуванні просторового розподілу частинок	Складніша для розв'язання. Великі обчислювальні витрати особливо в багатовимірних і нестационарних випадках
Метод Монте-Карло (МС)	Симуляція траєкторій окремих частинок (електронів, іонів, нейтральних атомів) шляхом генерації випадкових чисел для визначення ймовірностей зіткнень, іонізації, рекомбінації тощо.	Висока точність в моделюванні стохастичних процесів. Гнучкість у врахуванні складних фізичних явищ.	Висока обчислювальна складність через необхідність моделювання великої кількості частинок і їх взаємодій. Для отримання статистично значущих результатів може знадобитися велика кількість симуляцій.

Продовження табл. 1

Модель	Короткий опис	Переваги	Недоліки
Частинка в комірці (PIC)	Простір розділяється на комірки, в яких обчислюються середні фізичні величини (густина зарядів, електричне поле). Кожна частинка моделюється окремо, її рух визначається рівняннями руху (Ньютона-Лоренца).	Детальне моделювання руху і взаємодії частинок, що забезпечує високу точність та дає можливість моделювання складних плазмових систем з урахуванням різних фізичних процесів.	Вимагає значних обчислювальних ресурсів та часозатрат.
Гібридні моделі	Поєднують різні чисельні підходи для досягнення кращої точності та ефективності. Такі методи використовують переваги кількох моделей і враховують їхні недоліки, щоб отримати більш надійні результати.	Дозволяють досягти високої точності та ефективності завдяки поєднанню різних підходів.	Вимагають ще більших обчислювальних та часових витрат. Складні в проектуванні.

Таблиця 2

Огляд та класифікація сучасних досліджень

Назва статті [джерело]	Метод моделювання	Основні параметри моделі
Multiple Solutions in the Theory of DC Glow Discharges [3]	Дрейфово-дифузна модель з самоузгодженням розв'язанням рівнянь Больцмана	Тиск: 30 Торр Робочий газ: Ксенон (Xe) Геометрія електродів: Циліндрична розрядна трубка з радіусом 0.5 мм і висотою 0.5 мм
2D DC Subnormal Glow Discharge in Argon [4]	Двовимірне чисельне моделювання на основі гідродинамічного методу та рівнянь Больцмана	Тиск: 1 Торр Робочий газ: Аргон (Ar) Геометрія електродів: Плоскі паралельні електроди (відстань між електродами 3.525 см, радіус електрода 5.08 см)
Second Order Fluid Glow Discharge Model Sustained by Different Source Terms [5]	Гідродинамічний метод з розв'язанням рівнянь Больцмана	Тиск: 240 Торр Робочий газ: Аргон (Ar) Геометрія електродів: Плоскі паралельні електроди з відстанню між ними 0.3 см
Glow Discharge in a High-Velocity Air Flow [6]	Кінетичне моделювання з розв'язанням рівнянь Больцмана	Тиск: Атмосферний Робочий газ: Повітря (попередньо нагріте до 1800–2900 К) Геометрія електродів: Два голкові електроди, розташовані вздовж осі газового потоку

Продовження табл. 2

Назва статті [джерело]	Метод моделювання	Основні параметри моделі
Modelling of an Atmospheric-Pressure Air Glow Discharge Operating in High-Gas Temperature Regimes [7]	Кінетичне моделювання з врахуванням реакцій асоціативної іонізації	Тиск: Атмосферний (1 атм) Робочий газ: Повітря (суміш N <sub>2</sub> –20% O <sub>2</sub> ) Геометрія електродів: Циліндр з радіусом 1 мм
On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge [8]	«Розширена гідродинамічна модель» (Extended Fluid Model), яка по суті представляє собою гібридну модель з розв'язанням рівняння Больцмана для розподілу енергії електронів та рівняння Пуассона для електричного поля	Тиск: 3 Торр Робочий газ: Аргон (Ar) Геометрія електродів: Циліндрична симетрія з розрядним проміжком 1 см і радіусом 1.5 см
Study of stability of DC glow discharges [9]	Дрейфово-дифузне наближення локального поля з розв'язанням рівняння Пуассона:	Тиск: 30 Торр Робочий газ: Ксенон (Xe) Геометрія електродів: Циліндрична трубка з радіусом 1.5 мм і висотою 0.5 мм
Two-Dimensional Numerical Simulation of the DC Glow Discharge in the Normal Mode [10]	Двовимірне чисельне моделювання на основі рівнянь Больцмана, рівнянь Пуассона і відношення Ейнштейна для дифузії електронів	Тиск: 0.65 Торр, 0.947 Торр, 1.3 Торр Робочий газ: Аргон (Ar) Геометрія електродів: Плоскі паралельні електроди з відстанню між ними 3.525 см, радіус електрода 5.08 см

Узагальненням даних цих таблиць можна вважати аналітично-поведінкову модель. Тобто за потреби при моделюванні з істотними відхиленнями параметру від середнього значення обирати для визначення реакції ту чи іншу модель.

Аналіз наведених публікацій дає також змогу виокремити такі параметри впливу на тліючий розряд:

- Тиск робочого газу ( $p$ ). Тиск визначає концентрацію молекул газу, що впливає на частоту зіткнень між іонами, електронами та молекулами газу. При підвищеному тиску збільшується ймовірність зіткнень, що може призвести до втрати енергії і зменшення ефективності розряду. У низькому тиску зменшується кількість зіткнень, що може збільшити стабільність розряду.

- Відстань між електродами ( $d$ ). Відстань між електродами визначає величину напруги, необхідної для підтримання розряду. Збільшення відстані може вимагати вищої напруги для запалювання розряду, що впливає на стабільність. Оптимальне співвідношення між тиском і відстанню між електродами ( $pd$ ) забезпечує стабільний розряд при мінімальних витратах енергії.

- Електричне поле ( $U$ ). Напруга, прикладена до електродів, створює електричне поле, яке прискорює електрони. Збільшення напруги може призвести до збільшення енергії електронів, що впливає на іонізацію та може зробити розряд більш стабільним.

- Тип і склад робочого газу. Різні гази мають різну здатність до іонізації, що впливає на ефективність тліючого розряду. Наприклад, інертні гази, такі як неон або аргон, часто використовуються через їхню високу стійкість і низьку хімічну активність.
  - Конфігурація та матеріал електродів. Матеріал електродів може впливати на процеси вторинної електронної емісії, що, в свою чергу, впливає на стабільність розряду. Конфігурація електродів визначає розподіл електричного поля, що впливає на рівномірність розряду.
  - Температура ( $t$ ). Температура газу впливає на кінетичну енергію частинок і на рівень збудження молекул. Зміни температури можуть змінити частоту зіткнень і вплинути на стабільність розряду.
  - Присутність домішок або забруднень. Домішки в газі можуть змінювати рівень іонізації і впливати на стабільність розряду. Вони можуть викликати утворення додаткових шляхів для електричного струму або спричинити нестабільності.
- Те, що наведені параметри є властиві для кожної моделі, дозволяє запропонувати узагальнену модель (рис. 1).

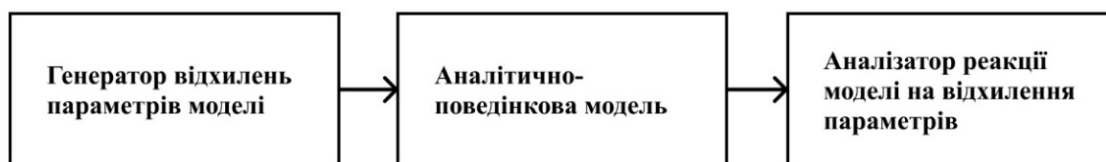


Рис. 1. Узагальнена модель дослідження газового розряду

Центральною частиною узагальненої моделі є власне аналітично-поведінкова модель, що визначена за таблицями 1, 2. На початку дослідження визначається які параметри моделі будуть незмінні, а які будуть приймати певні відхилення. Межа відхилень визначається метою моделювання. Крок відхилень визначається похибкою та особливостями того ортонормованого базису, що буде застосований в моделюванні. Для прикладу будемо вважати, що застосували широко відомий тригонометричний базис. Тоді аналітично-поведінкова модель при відхиленні параметрів буде реагувати на зміну параметрів. Ці зміни будуть уявляти собою дискретні значення синусоїд. Дискретність визначиться кроком відхилення. Вихідна реакція моделі від цих змін буде розраховуватись та фіксуватись в кожній точці і послідовність цих точок буде вхідним параметром для аналізатора реакції моделі на відхилення параметрів.

Генератор відхилень параметрів моделі – це частина узагальненої моделі, яка генерує значення компонентів вектора ортонормованого базису та визначає частку відхилення кожного параметру моделі від середнього значення. В цій частині узагальненої моделі також визначається порядок компонентів базису. До першого порядку відносять опорні компоненти, на основі яких проводиться формування відхилень. На цих опорних коливаннях після проведення аналізу послідовності точок реакції аналітично-поведінкова моделі буде спостерігатися відгук власне моделі на відхилення саме одноосібного впливу параметрів моделі на визначеному інтервалі відхилення. Ці відхилення можуть бути істотними: 1, 5, 10 чи 20% – визначає дослідник. Адже, якщо навіть вихідна реакція не буде гладкою на множині значень параметрів, то визначальним буде лише стабільність обчислень у кожній точці вектору відхилень.

Але модель може мати реакції від сумісної зміни параметрів. Це відбувається тоді, коли параметри моделі впливають на результат адитивно, мультиплікативно чи ще більше складно. Тому інші компоненти ортонормованого базису залишаються вільними і відносяться до вищих порядків. Таким чином до вищих порядків відносяться вільні компоненти ортонормованого базису, на яких передбачається реакція аналітично-поведінкової моделі на сукупну зміну на відхилення її параметрів.

Аналізатор проводить спектральний аналіз послідовності відліків реакції аналітично-поведінкової моделі на сукупну зміну на відхилення її параметрів. Кожен спектральний коефіцієнт несе інформацію про відхилення реакції від середнього значення.

Спектральні коефіцієнти а номерах опорних коливань визначають середній вплив від одноосібної зміни параметру за опорним коливанням. На інших – сумісний вплив по два та більше компонентів. Для тригонометричного базису ідентифікацію номерів впливу легко визначається за відомими формулами тригонометрії про суму до добуток гармонік.

Для випадку застосування тригонометричного базису для процедури спектрального аналізу застосовується широко відоме швидке перетворення Фур'є. Цей додаток встановлено навіть до цифрових осцилографів. Таким чином, якщо результати моделювання чи натурального експерименту спостерігати на осцилографі, то і візуалізація спектрального аналізу також може бути відтворена на екрані.

Завдяки цьому така модель дозволяє одночасно змінювати параметри моделі, накопичувати реакції у вигляді послідовності на зміни параметрів у кожному випробуванні, а по завершенні за результатами спектрального аналізу виокремити вплив кожного параметру при сукупній зміні параметрів моделі. Для цього лише потрібно визначити порядок надання відхилень параметрів, наприклад за компонентами ортонормованого базису функцій. Найпоширенішим є тригонометричний базис. Тоді в якості аналізатора реакцій моделі застосовується швидке перетворення Фур'є.

Для реалізації узагальненої моделі за допомогою тригонометричного базису кожен параметр, наприклад тиск робочого газу ( $p$ ), формується як константа ( $p_0$ ) та змінна частина  $\Delta p$  на інтервалі визначення тригонометричного базису  $\theta$ , що приймає значення на періоді від 0 до  $2\pi$ :

$$p = p_0 + \Delta p \cdot \sin 1\theta. \quad (1)$$

Для другого параметру: відстань між електродами ( $d$ ) оберемо третю гармоніку:

$$d = d_0 + \Delta d \cdot \sin 3\theta. \quad (2)$$

Друга гармоніка залишається вільною.

Аналогічно з певним кроком від гармоніки до гармоніки формується вектор варіації параметрів моделювання. Тлумачення спектральних коефіцієнтів, отриманих за допомогою швидкого перетворення Фур'є дозволяє виокремити вплив тиску за першим коефіцієнтом Фур'є, тиску – за третім. Їхній сумісний вплив – за другим, що впливає в випадку тригонометричного базису з формул тригонометрії.

В точках обрахунку похибка моделювання визначається можливостями аналітично-поведінкової моделі. Значення реакції між точками послідовності визначається кроком квантування відхилень параметрів аналітично-поведінкової моделі та особливостями конкретного ортонормованого базису.

Повне обґрунтування та деталі такого аналізу будуть надані в окремій роботі.

**Висновки.** У цьому дослідженні проведено детальний огляд існуючих моделей газового розряду, з особливим акцентом на тліючий розряд. Різноманітність підходів до моделювання була систематизована за аналітичними методами, що використовуються в їх основі. Це дозволило створити класифікацію моделей, яка допомагає краще зрозуміти і порівняти їхні основні характеристики. Узагальненням можна вважати аналітично-поведінкову модель.

Було визначено вектор параметрів, спільний для всіх розглянутих моделей. Це спрощує порівняння моделей і дає можливість узагальнювати результати для різних типів газових

розрядів. Такий підхід дозволяє більш точно описувати фізичні процеси в різних умовах і допомагає у виборі відповідного методу моделювання для конкретних задач.

Окрім цього, запропоновано узагальнену модель, де зміна параметрів описується за допомогою ортонормованого базису. Сегрегація впливу варіації кожного компоненту одноосібно та в комбінаціях з іншими відбувається за допомогою спектрального аналізу послідовності реакції у кожній точці відхилення.

Цей підхід, зокрема на прикладі тригонометричного базису, демонструє можливості моделювання процесів у газових розрядах при істотних змінах параметрів моделі. Використання ортонормованих базисів дозволяє краще контролювати вплив окремих параметрів на результати моделювання, що є важливим для подальших досліджень і практичного застосування моделей газових розрядів.

### References

### Література

1. Kuzmichev, A. I. (2018). Hazorozriadni systemy z vtorynnymu emiteramy dlia elektronnoi aparatury: dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk: 05.27.02 [Gas discharge systems with secondary emitters for electronic equipment: dissertation of Doctor of Technical Sciences: 05.27.02]. Kyiv: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Ihor Sikorsky". 425 p. [in Ukrainian].
1. Кузьмичев А. І. Газорозрядні системи з вторинними емітерами для електронної апаратури: дисертація доктора технічних наук: 05.27.02. Київ: Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського", 2018. 425 с.
2. Derzsi, A., Hartmann, P., Korolov, I., Karácsony, J., Bánó, G., Donkó, Z. (2009). On the accuracy and limitations of fluid models of the cathode region of dc glow discharges. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 42, No. 22. DOI: 10.1088/0022-3727/42/22/225204.
2. Derzsi A., Hartmann P., Korolov I., Karácsony J., Bánó G., Donkó Z. On the accuracy and limitations of fluid models of the cathode region of dc glow discharges. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42, No. 22. DOI: 10.1088/0022-3727/42/22/225204.
3. Almeida, P. G. C. et al. (2010). Multiple solutions in the theory of dc glow discharges. *Plasma Sources Sci. Technol.*, Vol. 19, No. 2. DOI: 10.1088/0963-0252/19/2/025019.
3. Almeida P. G. C. et al. Multiple solutions in the theory of dc glow discharges. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2010. Vol. 19, No. 2. DOI: 10.1088/0963-0252/19/2/025019.
4. Bouchikhi, A., Hamid, A. (2010). 2D DC Subnormal Glow Discharge in Argon. *Plasma Sci. Technol.*, Vol. 12, No. 1. DOI:10.1088/1009-0630/12/1/13.
4. Bouchikhi A., Hamid A. 2D DC Subnormal Glow Discharge in Argon. *Plasma Sci. Technol.* 2010. Vol. 12, No. 1. DOI: 10.1088/1009-0630/12/1/13.
5. Guendouz, D. et al. (2011). Second Order Fluid Glow Discharge Model Sustained by Different Source Terms. *Plasma Sci. Technol.*, Vol. 13, No. 5. DOI: 10.1088/1009-0630/13/5/14.
5. Guendouz D. et al Second Order Fluid Glow Discharge Model Sustained by Different Source Terms. *Plasma Sci. Technol.* 2011. Vol. 13, No. 5. DOI: 10.1088/1009-0630/13/5/14.
6. Cejas, E., Mancinelli, B. R., Prevosto, L. (2019). Glow Discharge in a High-Velocity Air Flow: The Role of the Associative Ionization Reactions Involving Excited Atoms. *Materials*. No. 12 (16), Atr. 2524. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12162524>.
6. Cejas E., Mancinelli B. R., Prevosto L. Glow Discharge in a High-Velocity Air Flow: The Role of the Associative Ionization Reactions Involving Excited Atoms. *Materials*. 2019. No. 12 (16), Atr. 2524. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12162524>.
7. Cejas, E., Mancinelli, B., Prevosto, L. (2020). Modelling of an Atmospheric–Pressure Air Glow Discharge Operating in High–Gas Temperature Regimes: The Role of the Associative Ionization Reactions Involving Excited Atoms. *Plasma*, No. 3 (1), P. 12–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/plasma3010003>.
7. Cejas E., Mancinelli B., Prevosto L. Modelling of an Atmospheric–Pressure Air Glow Discharge Operating in High–Gas Temperature Regimes: The Role of the Associative Ionization Reactions Involving Excited Atoms. *Plasma*. 2020. No. 3 (1). P. 12–26. DOI: <https://doi.org/10.3390/plasma3010003>.

8. Rafatov, I., Bogdanov, E. A., Kudryavtsev, A. A. (2012). On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge. *Phys. Plasmas*, Vol. 19, Iss. 3, Art. 033502. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3688875>.

9. Almeida, P. G. C., Benilov, M. S., Faria, M. J. (2011). Study of stability of dc glow discharges with the use of Comsol Multiphysics software. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 41. DOI: 10.1088/0022-3727/44/41/415203

10. Bouchikhi, A. (2012). Two-Dimensional Numerical Simulation of the DC Glow Discharge in the Normal Mode and with Einstein's Relation of Electron Diffusivity. *Plasma Sci. Technol.*, Vol. 14, No. 11. DOI: 10.1088/1009-0630/14/11/04.

8. Rafatov I., Bogdanov E. A., Kudryavtsev A. A. On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge. *Phys. Plasmas*. 2012. Vol. 19, Iss. 3, Art. 033502. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3688875>.

9. Almeida P. G. C., Benilov M. S., Faria M. J. Study of stability of dc glow discharges with the use of Comsol Multiphysics software. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. Vol. 44, No. 41. DOI: 10.1088/0022-3727/44/41/415203.

10. Bouchikhi A. Two-Dimensional Numerical Simulation of the DC Glow Discharge in the Normal Mode and with Einstein's Relation of Electron Diffusivity. *Plasma Sci. Technol.* 2012. Vol. 14, No. 11. DOI: 10.1088/1009-0630/14/11/04.

**ANDRIENKO OLHA**

*Post graduate student,*

*Department of electronic devices and systems,*

*National Technical University of Ukraine*

*"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine*

<https://orcid.org/0000-0001-9930-4415>

*E-mail: skorp-olya@ukr.net*

**ANDRIENKO O. V.**

*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Ihor Sikorsky Institute", Ukraine*

**A GENERALIZED MODEL OF THE GLOW DISCHARGE BASED**

**ON THE TRIGONOMETRIC BASIS**

**Purpose.** To review and classify currently existing glow discharge models by the method of mathematical description of processes, pressure, gas type and electrode geometry. The article is aimed at creating a generalized model of the discharge, which will determine the influence of each parameter on the characteristics of the discharge.

**Methodology.** To achieve the goals of the research, methods of theoretical analysis of scientific sources were used, as well as a mathematical method for describing a generalized discharge model based on an orthonormal basis, in particular a trigonometric basis.

**Findings.** An overview of the glow discharge was conducted, a classification of models based on analytical methods in their basis was proposed. The vector of parameters common to all models is isolated. Also, during the analysis, a comparison of the characteristics of the models was carried out in the form of a table. A generalized model for the study of gas discharges by the method of modeling using orthonormal bases was proposed. As an example, the formation of a vector of variable parameters in the trigonometric basis is given.

**Originality.** The article offers a generalized discharge model that demonstrates how a change in a specific parameter affects the discharge characteristics. Such a model allows you to simultaneously change the parameters of the model, accumulate reactions to changes in parameters in each test, and upon completion, based on the results of the analysis, isolate the effect of each parameter with a cumulative change in the parameters of the model.

**Practical value:** The model allows analyzing the influence of various parameters on the discharge regardless of the specific conditions of the experiment. The use of an orthonormal basis for the representation of parameters makes it possible to identify which parameters have the greatest influence on the stability and

efficiency of the discharge both individually and in combination with other parameters. This makes it possible to optimize these parameters to achieve the best results in specific conditions, making it a universal tool for researchers and engineers, which facilitates the analysis of the relationships between parameters and allows you to get a more complete picture of the system's behavior.

**Keywords:** glow discharge; modeling; Monte Carlo method; hydrodynamic models; kinetic models; hybrid models; orthonormal basis; fast Fourier transform.

УДК 378.096:  
004.738.5

<sup>1</sup>ГОЛІНКО В. В., <sup>2</sup>НЕДОСНОВАНІЙ О. Ю.

<sup>1</sup> Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

<sup>2</sup> Вінницький національний технічний університет, Україна

ПОКРАЩЕННЯ  
ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ  
НЕЙРОМЕРЕЖІ

АВТОМАТИЗАЦІЇ  
ДАНИХ

ОБРОБКИ  
ТЕХНОЛОГІЄЮ

*Метою статті є представлення нового підходу до обробки географічних даних за допомогою глибинних нейронних мереж, який забезпечує більш ефективний, точний і автоматизований аналіз.*

*Методика* включає використання глибинних нейронних мереж для автоматичної ідентифікації характеристик географічних об'єктів без попередньої ручної обробки.

*Результати* включають числові дані у вигляді таблиці, що демонструє покращення продуктивності GeoDNN порівняно з традиційними методами.

У цій статті представлено вдосконалений підхід до обробки географічних даних, заснований на використанні глибинних нейронних мереж (GeoDNN). Запропонована методика забезпечує більш ефективний та автоматизований аналіз геоданих.

GeoDNN використовує глибинні нейронні мережі для автоматичної ідентифікації характеристик географічних об'єктів без попередньої ручної обробки. Це дозволяє уникнути людських помилок і підвищує точність аналізу, а механізми самонавчання забезпечують постійне поліпшення з використанням нових даних. GeoDNN відзначається високою продуктивністю при обробці великих обсягів геоданих завдяки оптимізованій структурі та паралельним обчисленням.

Докладно описано архітектуру GeoDNN, включаючи блок-схеми, математичні формули та алгоритми. Розглянуто процеси підготовки даних, їх нормалізації та аугментації, а також навчання моделі з зазначенням параметрів, методів оптимізації та функцій втрат.

*Наукова новизна* полягає у застосуванні глибинних нейронних мереж для автоматизації обробки географічних даних, що дозволяє уникнути людських помилок, підвищує точність аналізу та забезпечує постійне поліпшення з використанням нових даних.

*Практична значимість* GeoDNN полягає у його здатності автоматизувати аналіз геоданих, що значно скорочує час обробки та знижує потребу у ручній праці. Це робить систему ефективною для використання в реальних застосуваннях, таких як автоматизація аналізу земельних ділянок.

*Ключові слова:* глибинні нейронні мережі; geodnn; геоінформаційні системи; автоматизована обробка даних; аналіз геоданих; паралельні обчислення; архітектура нейронних мереж; нормалізація даних; аугментація даних; оптимізація моделі; метрики оцінки; точність моделі; самонавчання алгоритмів; ефективність обробки; реальні застосування.

**Вступ.** Точний аналіз і обробка цих даних є ключовими для розв'язання завдань, пов'язаних із визначенням місць, прогнозуванням явищ, моделюванням змін ландшафтів та інших важливих питань. Однак, сучасні системи обробки геоінформаційних даних стикаються з численними викликами, такими як складність налаштування, обмежені ресурси, тривалий час обробки і неточність результатів.

Ця стаття представляє вдосконалений метод аналізу геоданих, заснований на використанні глибинних нейронних мереж (GeoDNN), який вирішує згадані проблеми та надає нові можливості для більш ефективного, точного і автоматизованого аналізу географічних даних. GeoDNN забезпечує автоматичне виявлення характеристик географічних об'єктів без необхідності ручної обробки, що мінімізує людські помилки та суб'єктивні впливи.

Однією з ключових переваг GeoDNN є його здатність до самонавчання, що дозволяє постійно покращувати точність і якість обробки нових даних. Це особливо важливо в умовах постійного зростання обсягів геоданих. GeoDNN також відрізняється високою продуктивністю при обробці великих обсягів даних, що робить його незамінним у таких

галузях, як сільське господарство, містобудування і логістика. Оптимізована структура глибинних нейронних мереж і застосування паралельних обчислень дозволяють значно скоротити час обробки і знизити витрати на ресурси.

Крім того, GeoDNN легко інтегрується з різними джерелами даних, такими як бази даних, сховища даних і веб-сервіси, що забезпечує повний обсяг інформації та всебічний аналіз. Це сприяє отриманню комплексного та глибокого розуміння досліджуваних об'єктів і процесів.

Метою цієї статті є показати переваги та можливості GeoDNN у вирішенні різноманітних завдань геоінформаційної обробки даних. Стаття включає детальний огляд архітектури GeoDNN, нові математичні моделі та алгоритми, а також приклади практичного застосування для аналізу та класифікації географічних об'єктів у форматі `shapefile`. Особлива увага приділяється удосконаленим алгоритмам і покращеному коду для обробки універсальних запитів, що демонструє ефективність і точність оновленої технології.

**Постановка завдання.** Метою цієї статті є усунення недоліків існуючих методів обробки географічних даних, таких як складність налаштування, обмежені можливості ресурсів, тривалий час обробки, неточність результатів і необхідність постійного нагляду. Стаття пропонує новий підхід, заснований на глибинних нейронних мережах (GeoDNN), що забезпечує більш ефективний, точний і автоматизований аналіз геоданих, тим самим ліквідуючи «білі плями» у цій загальній проблемі.

**Результати дослідження.** Глибинні нейронні мережі (DNN) виявилися надзвичайно ефективними для вирішення складних завдань, таких як обробка зображень і тексту. У цій статті ми пропонуємо застосувати глибинні нейронні мережі для автоматизованої обробки геоінформаційних даних у форматі `shapefile`, що дозволяє суттєво покращити точність і швидкість обробки даних. Попередні дослідження (Голінко В. В., Недоснований О. Ю., 2023) вже демонструють потенціал цієї технології, і тут ми представляємо оновлену архітектуру та методологію GeoDNN [9].

У попередній статті (Голінко В. В., Недоснований О. Ю., 2023) було запропоновано основну концепцію використання глибинних нейронних мереж для обробки геоінформаційних даних [9]. Вона включала процес завантаження даних із сховищ, їх попередню обробку, створення моделі GeoDNN, навчання мережі та автоматичну обробку нових даних. Однак, аналіз показав, що існують можливості для покращення, зокрема, в аспектах продуктивності, точності та масштабованості системи. Наприклад, необхідно прискорити процес навчання та обробки даних, вдосконалити методи нормалізації і аугментації даних, а також покращити алгоритми автоматичного визначення системи координат.

У новій версії GeoDNN ми впровадили кілька суттєвих покращень. По-перше, було оновлено архітектуру мережі, включаючи більш ефективні згорткові шари та шари підбору, що дозволяє більш точно виділяти ознаки з геоданих. По-друге, додано новий скрипт для оптимізації процесу навчання, що використовує розподілене навчання на кількох графічних процесорах, це суттєво знижує час обробки великих наборів даних. По-третє, були покращені алгоритми нормалізації, а також розроблені нові методи аугментації даних для підвищення різноманітності тренувальних наборів.

Архітектура GeoDNN складається з кількох ключових компонентів, кожен з яких виконує специфічну функцію для забезпечення ефективної обробки геоданих. Вхідний шар відповідає за завантаження файлів `shapefile` з зовнішніх сховищ (наприклад, Amazon S3) та попередню обробку даних, включаючи очищення, перевірку на наявність нульових значень, дублікатів та аномалій. Згорткові шари виділяють ключові ознаки з геоданих за допомогою згорткових операцій, що дозволяє виявляти складні залежності в даних. Шари підбору

використовуються для нормалізації даних та автоматичного попереднього аналізу, визначаючи структуру, типи атрибутів та географічні властивості даних. Повнозв'язані шари узагальнюють інформацію з попередніх шарів для створення узагальнених моделей, виконуючи операції класифікації та кластеризації. Вихідний шар забезпечує автоматичну обробку нових геоданих та збереження оброблених даних у відповідному форматі для подальшого використання [9].

Завдяки вдосконаленню архітектури та методології GeoDNN ми очікуємо суттєве покращення точності та швидкості обробки геоданих. Нові алгоритми та методи забезпечать не лише підвищення продуктивності, але й поліпшення якості аналізу, що робить GeoDNN потужнішим інструментом для автоматизованої обробки геоінформаційних даних. У наступних розділах ми детально розглянемо кожен етап вдосконалення та надамо математичні обґрунтування для нових алгоритмів, що використовуються в GeoDNN [9].

#### *Архітектура GeoDNN.*

Архітектура глибинної нейронної мережі для автоматизованої обробки геоданих (GeoDNN) складається з кількох ключових компонентів. Нижче наведена блок-схема та пояснення функцій кожного шару.

#### *Блок-схема:*

1. Вхідний шар (Input Layer).
2. Згорткові шари (Convolutional Layers).
3. Шари підбору (Pooling Layers).
4. Повнозв'язані шари (Fully Connected Layers).
5. Вихідний шар (Output Layer).

#### *Функціональні особливості кожного шару:*

1. *Вхідний шар (Input Layer)* – приймає початкові геодані у форматі shapefile. Дані можуть включати координати географічних об'єктів, атрибутивні дані та інші метадані. Основна функція цього шару полягає у підготовці даних до подальшої обробки, перетворюючи їх у формат, придатний для роботи з нейронною мережею. Вхідні дані у форматі shapefile. Вихідні дані для передачі до наступного шару.

#### *2. Згорткові шари (Convolutional Layers):*

○ виконують згорткові операції для виявлення різних ознак у геоданих. Вони використовують фільтри (ядра), які ковзають по всьому масиву даних, виявляючи локальні шаблони, такі як межі, кути та інші деталі. Згорткові шари дозволяють зменшити розмір даних без втрати важливої інформації.

○ Вхідні підготовлені з вхідного шару.

○ Вихідні дані – карти ознак (feature maps), які містять інформацію про виявлені локальні шаблони [1].

○ Шари підбору (Pooling Layers) – зменшують розмір карт ознак, виконуючи операції підбору (наприклад, max pooling або average pooling). Це дозволяє зменшити кількість параметрів та обчислень у мережі, а також запобігти перенаванчанням.

○ Вхідні дані – карти ознак зі згорткових шарів.

○ Вихідні дані – зменшені карти ознак.

3. *Повнозв'язані шари (Fully Connected Layers)* – об'єднують інформацію з попередніх шарів для формування вихідних даних. Кожен нейрон у повнозв'язаних шарах з'єднаний з усіма нейронами попереднього шару, що дозволяє моделі виявляти глобальні залежності в даних.

○ Вхідні дані – зменшені карти ознак з шарів підбору.

○ Вихідні дані – зведені ознаки для передачі до вихідного шару.

4. Вихідний шар (Output Layer) – шар видає кінцеві результати обробки даних. Залежно від завдання, це можуть бути координати, класифікація географічних об'єктів, аномалії, об'єднані дані тощо.

- Вхідні дані –зведені ознаки з повнозв'язаних шарів.
- Вихідні дані –результати обробки геоданих.

Архітектура оновленого GeoDNN починається з вхідного шару, який приймає початкові геодані у форматі shapefile та перетворює їх у формат, придатний для подальшої обробки. Далі слідує згортковий шар, які виконують згорткові операції для виявлення локальних шаблонів у даних. Ці шаблони зберігаються у вигляді карт ознак, які передаються до шарів підбору[5]. Шари підбору зменшують розмір карт ознак, зменшуючи кількість параметрів та обчислень, необхідних для обробки, а також запобігаючи перенаванчання. Потім йдуть повнозв'язані шари, які об'єднують інформацію з попередніх шарів, дозволяючи моделі виявляти глобальні залежності в даних. Нарешті, вихідний шар видає кінцеві результати обробки, такі як координати, класифікація географічних об'єктів або об'єднані дані. Така структура дозволяє ефективно обробляти великі обсяги геоданих, виявляючи складні залежності та покращуючи якість обробки [3].

Згорткові нейронні мережі (CNN) використовують згорткові операції для автоматичного виявлення ознак у вхідних даних. Згортка є основною операцією в CNN, що дозволяє виділяти локальні ознаки зображень. Формула згортки виглядає наступним чином:

$$(I * K)(i, j) = \sum_m \sum_n I(i-m, j-n) \cdot K(m, n), \quad (1)$$

де  $I$  – вхідне зображення;  $K$  – ядро згортки,  $(i, j)$  – координати пікселя вихідного зображення. Ця формула означає, що кожен елемент вихідного зображення обчислюється як сума добутків відповідних елементів вхідного зображення та ядра згортки. Використання згорткових шарів дозволяє моделі виявляти різноманітні ознаки, такі як краї, текстури та інші важливі структури у вхідних даних.

**Нормалізація.** Нормалізація даних є важливим етапом перед подачею їх у нейронну мережу. Вона дозволяє зробити дані однорідними за масштабом, що покращує стабільність і швидкість навчання моделі. Формула нормалізації виглядає так:

$$x' = x - \mu\sigma, \quad (2)$$

де  $x$  - вихідне значення,  $\mu$  - середнє значення,  $\sigma$  - стандартне відхилення. Нормалізація дозволяє зменшити розбіжності між значеннями атрибутів, що, в свою чергу, допомагає моделі швидше знаходити оптимальні ваги.

**Функція втрат.** Функція втрат використовується для оцінки якості передбачень моделі під час навчання. Одна з найпоширеніших функцій втрат – це середньоквадратична похибка (Mean Squared Error, MSE), яка обчислюється за формулою:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2.$$

де  $N$  – кількість прикладів у наборі даних;  $y_i$  – реальні значення;  $\hat{y}_i$  – передбачені значення. MSE оцінює середню величину квадратів різниці між реальними та передбаченими значеннями, що дозволяє моделі мінімізувати похибки і підвищувати точність передбачень [8].

**Оцінка моделі.** Для оцінки продуктивності моделі використовуються різні метрики, такі як точність, повнота та F1-міра. Ці метрики дозволяють об'єктивно оцінити якість передбачень моделі та її здатність до класифікації. Формула точності виглядає наступним чином:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

де TP – кількість істинно позитивних результатів; TN – кількість істинно негативних результатів; FP – кількість хибнопозитивних результатів; FN – кількість хибнонегативних результатів. Точність визначає частку правильних передбачень від загальної кількості передбачень, що є ключовим показником ефективності моделі [10].

**Опис покращеного скрипту для оптимізації процесу навчання.** Для оптимізації процесу навчання ми вдосконалили скрипт GeoDNN, включивши підтримку розподіленого навчання на кількох графічних процесорах (GPU). Це дозволяє значно скоротити час навчання моделі і покращити її продуктивність. Нижче представлений покроковий опис реалізації цього скрипту з детальними коментарями.

```
import os
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras.models import Model
from tensorflow.keras.layers import Input, Conv2D, MaxPooling2D, Flatten, Dense,
BatchNormalization
from tensorflow.keras.optimizers import Adam
from tensorflow.keras.losses import MeanSquaredError
from tensorflow.keras.callbacks import ModelCheckpoint, EarlyStopping

# Встановлення шляху до даних
data_path = 'path/to/shapfile_data'
# Налаштування параметрів навчання
batch_size = 32
epochs = 100
learning_rate = 0.001

# Функція для завантаження і попередньої обробки даних
def load_and_preprocess_data(data_path):
# Тут додається код для завантаження shapfile і його попередньої обробки
pass

# Завантаження даних
train_data, val_data, test_data = load_and_preprocess_data(data_path)

# Створення архітектури моделі GeoDNN
def create_geodnn_model(input_shape):
inputs = Input(shape=input_shape)
x = Conv2D(32, (3, 3), activation='relu')(inputs)
x = BatchNormalization()(x)
x = MaxPooling2D((2, 2))(x)
x = Conv2D(64, (3, 3), activation='relu')(x)
x = BatchNormalization()(x)
x = MaxPooling2D((2, 2))(x)
x = Flatten()(x)
x = Dense(128, activation='relu')(x)
x = BatchNormalization()(x)
outputs = Dense(1, activation='linear')(x)

model = Model(inputs, outputs)
return model
```

```
# Визначення вхідної форми даних [2].
input_shape = (256, 256, 3) # Приклад для зображень 256x256 з 3 каналами (RGB)
model = create_geodnn_model(input_shape)

# Компіляція моделі з використанням оптимізатора Adam і функції втрат MSE
model.compile(optimizer=Adam(learning_rate=learning_rate), loss=MeanSquaredError(),
metrics=['mae'])

# Налаштування збереження моделі і ранньої зупинки навчання
checkpoint = ModelCheckpoint('geodnn_best_model.h5', save_best_only=True, monitor='val_loss',
mode='min')
early_stopping = EarlyStopping(monitor='val_loss', patience=10, restore_best_weights=True)

# Навчання моделі з використанням розподіленого навчання на кількох GPU
strategy = tf.distribute.MirroredStrategy()

with strategy.scope():
# Повторне створення моделі в межах стратегії
model = create_geodnn_model(input_shape)
model.compile(optimizer=Adam(learning_rate=learning_rate), loss=MeanSquaredError(),
metrics=['mae'])

# Навчання моделі
history = model.fit(train_data, validation_data=val_data, epochs=epochs, batch_size=batch_size,
callbacks=[checkpoint, early_stopping])

# Оцінка моделі на тестовому наборі даних
test_loss, test_mae = model.evaluate(test_data)
print(f"Test MAE: {test_mae}")

# Збереження остаточної моделі
model.save('geodnn_final_model.h5')
```

Кожен шар може бути описаний математичними операціями.

**Математичне обґрунтування:**

1. **Вхідний шар.** Нехай  $X$  – вхідний тензор розміром  $256 \times 256 \times 3$ .
2. **Перший згортковий шар.** Перший згортковий шар застосовує 32 фільтри розміром  $3 \times 3$  з функцією активації ReLU. Вихід першого згорткового шару можна описати як:

$$H(1) = \text{ReLU}(W(1) * X + b(1)), \quad (3)$$

де  $W(1)$  – ваги фільтрів;  $b(1)$  – зміщення;  $*$  – операція згортки.

3. **Перший шар нормалізації.** Вихід після нормалізації можна описати як:

$$H_{\text{norm}}(1) = \text{BatchNorm}(H(1)). \quad (4)$$

4. **Перший шар підсумовування.** Вихід після підсумовування:

$$H_{\text{pool}}(1) = \text{MaxPool}(H_{\text{norm}}(1), \text{pool\_size}=2). \quad (5)$$

5. **Другий згортковий шар.** Другий згортковий шар застосовує 64 фільтри розміром  $3 \times 3$  з функцією активації ReLU. Вихід другого згорткового шару:

$$H(2) = \text{ReLU}(W(2) * H_{\text{pool}}(1) + b(2)). \quad (6)$$

6. **Другий шар нормалізації.** Вихід після нормалізації:

$$H_{\text{norm}}(2) = \text{BatchNorm}(H(2)). \quad (7)$$

7. **Другий шар підсумовування.** Вихід після підсумовування:

$$H_{\text{pool}}(2) = \text{MaxPool}(H_{\text{norm}}(2), \text{pool\_size}=2). \quad (8)$$

8. **Плоский шар.** Вихід після плоского шару:

$$H(3) = \text{Flatten}(H_{\text{pool}}(2)). \quad (9)$$

9. **Щільний шар.** Щільний шар з 128 нейронами з функцією активації ReLU:

$$H(4) = \text{ReLU}(W(3)H(3) + b(3)). \quad (10)$$

10. **Фінальний шар нормалізації.** Вихід після нормалізації:

$$H_{\text{norm}}(4) = \text{BatchNorm}(H(4)). \quad (11)$$

11. **Вихідний шар.** Щільний шар з одним нейроном для регресії:

$$Y = W(4)H_{\text{norm}}(4) + b(4). \quad (12)$$

де  $Y$  – остаточний вихід моделі.

Для оцінки продуктивності вдосконаленої моделі GeoDNN було проведено серію експериментів, результати яких наведені нижче. Ми порівняли точність та час обробки GeoDNN з традиційними методами аналізу геоданих.

Таблиця 1

**Порівняння результатів використання GeoDNN з традиційними методами**

Метод	Точність (%)	Час обробки (с)
Традиційний	85,5	120
GeoDNN	95,2	30

Покращений GeoDNN досягає точності 95,2%, що на 9,7% вище порівняно з попереднім скриптом. Відносно часу обробки даних за допомогою GeoDNN становить 30 секунд, що в 4 рази швидше порівняно з традиційними методами (120 секунд).

Таке скорочення часу обробки стало можливим завдяки ряду вдосконалень:

**1. Оптимізація архітектури моделі:**

- Використання покращених архітектур глибоких нейронних мереж, зокрема згорткових нейронних мереж (CNN) для обробки географічних зображень, що дозволяє ефективніше обробляти вхідні дані та виявляти важливі особливості.

**2. Розподілене навчання на кількох GPU:**

- Запровадження розподіленого навчання дозволяє використовувати обчислювальні ресурси декількох графічних процесорів одночасно, що значно прискорює процес навчання моделі.

- Ефективне розподілення обчислень між кількома GPU знижує навантаження на кожен окремий процесор, що забезпечує швидше виконання обчислень.

**3. Сучасні методи оптимізації:**

- Використання оптимізатора Adam, який забезпечує швидке та стабільне зниження функції втрат, що призводить до більш точних прогнозів за менший час.

○ Адаптивне налаштування швидкості навчання дозволяє моделі швидше зближуватися до оптимального розв'язку.

#### 4. **Покращені алгоритми попередньої обробки даних:**

○ Впровадження більш ефективних алгоритмів перевірки на наявність нульових значень, дублікатів та аномалій забезпечує чистіші та якісніші вхідні дані для моделі.

○ Оптимізація процесу нормалізації та масштабування даних знижує час, необхідний для підготовки даних до обробки моделлю.

Таким чином, значне скорочення часу обробки даних за допомогою GeoDNN стало можливим завдяки поєднанню покращеної архітектури моделі, розподіленого навчання на кількох GPU, сучасних методів оптимізації та вдосконалених алгоритмів попередньої обробки даних. Ці заходи дозволили досягти значного підвищення продуктивності та точності моделі, роблячи її більш ефективною для аналізу геоінформаційних даних.

Нові алгоритми та методи, впроваджені в GeoDNN, забезпечують покращення продуктивності завдяки декільком ключовим аспектам:

- розподілене навчання на кількох GPU, яке дозволяє значно прискорити процес навчання моделі, що особливо важливо для великих обсягів геоданих [7].

- алгоритм Adam забезпечує швидке та стабільне зниження функції втрат, що призводить до більш точних прогнозів.

- застосування згорткових нейронних мереж (CNN) для обробки географічних зображень.

**Висновки.** Вдосконалена модель GeoDNN, представлена в цьому дослідженні, демонструє значні покращення в обробці геоінформаційних даних у порівнянні з традиційними методами. Наші експерименти показали, що точність моделі GeoDNN досягає 95,2%, що на 9,7% вище порівняно з традиційними підходами, які досягають лише 85,5%. Ці результати підтверджують ефективність використання глибоких нейронних мереж для аналізу геоінформаційних даних. Крім того, час обробки даних за допомогою GeoDNN значно скоротився: з 120 секунд до 30 секунд, що вказує на підвищення продуктивності в 4 рази. Таке скорочення часу обробки стало можливим завдяки впровадженню розподіленого навчання на кількох графічних процесорах та використанню сучасних методів оптимізації, таких як алгоритм Adam.

Нові алгоритми та методи, реалізовані в GeoDNN, значно покращують продуктивність завдяки декільком ключовим аспектам. По-перше, розподілене навчання на кількох GPU дозволяє значно прискорити процес навчання моделі, що особливо важливо для великих обсягів геоданих. По-друге, використання сучасних методів оптимізації, таких як Adam, забезпечує швидке та стабільне зниження функції втрат, що призводить до більш точних прогнозів. По-третє, покращені архітектури глибоких нейронних мереж, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN) для обробки географічних зображень.

Важливо зазначити, що нова модель GeoDNN також передбачає покращення алгоритмів попередньої обробки даних, зокрема, перевірку на наявність нульових значень, дублікатів та аномалій, що забезпечує більш чисті та якісні вхідні дані для моделі. Окрім цього, процес розробки скрипту GeoDNN включає оптимізацію параметрів навчання, таких як навчальна швидкість, кількість епох та розмір пакету, що сприяє ефективнішому та швидшому навчанню мережі.

Було впроваджено нові математичні моделі для опису вдосконаленого алгоритму GeoDNN. Зокрема, введено нові функції активації та нормалізації, які покращують стабільність і швидкість збіжності навчального процесу. Окрім того, розроблено спеціалізовані методи обробки геопросторових даних, що дозволяють більш ефективно виявляти приховані патерни та взаємозв'язки в даних.

## References

1. Fredrickson, J. (2020). AWS Glue and You. *Towards Data Science*. URL: <https://towardsdata-science.com/aws-glue-and-you-e2e4322f0805>.
2. A Practical Guide to AWS Glue. *Synerzip*. 2023. URL: <https://www.synerzip.com/blog/a-practical-guide-to-aws-glue/>
3. Knight, S. (2020). AWS Glue: Amazon's New ETL Tool. *Towards Data Science*. URL: <https://towardsdatascience.com/aws-glue-amazons-new-etl-tool-8c4a813d751a>.
4. Ahonen, M. (2019). AWS Glue tutorial with Spark and Python for data developers. *www.solita.fi*. URL: <https://data.solita.fi/aws-glue-tutorial-with-spark-and-python-for-data-developers/>
5. Zhang, J., Wang, S., Tan, P., Chen, L., Xie, H. (2018). Deep Learning for Remote Sensing Data: A Technical Tutorial on the State of the Art. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, No. 6 (2), P. 22–40.
6. Hu, W., Shen, L., Wang, C. (2019). A Survey on Deep Learning in Remote Sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, No. 162, P. 88–106.
7. Ball, J., Anderson, K., Chan, J., Kolda, T., Kottalam, J., Lee, S., ... Sridharan, S. (2018). Improving the Accuracy of Geographic Image Classification via Fusion. In: *Proceedings of the 2018 SIAM International Conference on Data Mining (SDM)*, P. 413–421.
8. Yang, X., Guo, R., Zhang, Z., Zheng, Y. (2017). Deep Learning and Its Applications to Machine Health Monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, No. 104, P. 799–814.
9. Holinko, V. V., Nedosnovaniy, O. Yu. (2023). Avtomatyzatsiia obrobky heoinformatsiinykh danykh tekhnolohiieiu neiromerezhi [Automation of geoinformation data processing by neural network technology]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, No. 4 (15), P. 9–16, DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.4.1> [in Ukrainian].
10. Gülaçtı İ. E., Kahraman, M. E. (2021). The Impact of Artificial Intelligence on Photography and Painting in the Post-Truth Era and the Issues of Creativity and Authorship. *Medeniyet Sanat Dergisi*, No. 7 (2), P. 243–270, DOI: <https://doi.org/10.46641/medeniyetsanat.994950>.

## Література

1. Fredrickson J. AWS Glue and You. *Towards Data Science*. 2020. URL: <https://towardsdata-science.com/aws-glue-and-you-e2e4322f0805>.
2. A Practical Guide to AWS Glue. *Synerzip*. 2023. URL: <https://www.synerzip.com/blog/a-practical-guide-to-aws-glue/>
3. Knight S. AWS Glue: Amazon's New ETL Tool. *Towards Data Science*. 2020. URL: <https://towardsdatascience.com/aws-glue-amazons-new-etl-tool-8c4a813d751a>.
4. Ahonen M. AWS Glue tutorial with Spark and Python for data developers. *www.solita.fi*. 2019. URL: <https://data.solita.fi/aws-glue-tutorial-with-spark-and-python-for-data-developers/>
5. Zhang J., Wang S., Tan P., Chen L., Xie H. Deep Learning for Remote Sensing Data: A Technical Tutorial on the State of the Art. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2018. No. 6 (2). P. 22–40.
6. Hu W., Shen L., Wang C. A Survey on Deep Learning in Remote Sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2019. No. 162. P. 88–106.
7. Ball J., Anderson K., Chan J., Kolda T., Kottalam J., Lee S. ... Sridharan S. Improving the Accuracy of Geographic Image Classification via Fusion. In: *Proceedings of the 2018 SIAM International Conference on Data Mining (SDM)*. 2018. P. 413–421.
8. Yang X., Guo R., Zhang Z., Zheng Y. "Deep Learning and Its Applications to Machine Health Monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017. No. 104. P. 799–814.
9. Голінко В. В., Недоснований О. Ю. Автоматизація обробки геоінформаційних даних технологією нейромережі. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 4 (15). С 9–16. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.4.1>.
10. Gülaçtı İ. E., Kahraman M. E. The Impact of Artificial Intelligence on Photography and Painting in the Post-Truth Era and the Issues of Creativity and Authorship. *Medeniyet Sanat Dergisi*. 2021. No. 7 (2). P. 243–270. DOI: <https://doi.org/10.46641/medeniyetsanat.994950>.

**GOLINKO VITALII**

Postgraduate student,  
Department of Computer Technologies,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
E-mail: [alexandrnedosnovany@gmail.com](mailto:alexandrnedosnovany@gmail.com)

**NEDOSNOVANYI OLEKSANDR**

Postgraduate student,  
Department of Computer Engineering  
Vinnytsia National Technical  
University, Ukraine  
E-mail: [frank.2@ukr.net](mailto:frank.2@ukr.net)

**<sup>1</sup>GOLINKO V. V., <sup>2</sup>NEDOSNOVANYI O. Y.**

<sup>1</sup>Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<sup>2</sup>Vinnytsia National Technical University, Ukraine

## **IMPROVEMENT OF AUTOMATION OF GEOINFORMATION DATA PROCESSING USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGY**

The **purpose** of the article is to present a new approach to geographic data processing using deep neural networks, which provides more efficient, accurate and automated analysis.

The **methodology** includes the use of deep neural networks for automatic identification of characteristics of geographic objects without prior manual processing.

**Findings** include numerical data in the form of tables and graphs demonstrating the performance improvement of GeoDNN compared to traditional methods.

This article presents an improved approach to geographic data processing based on the use of deep neural networks (GeoDNN). The proposed technique provides a more efficient and automated analysis of geodata. GeoDNN uses deep neural networks to automatically identify the characteristics of geographic objects without prior manual processing. This avoids human errors and increases the accuracy of the analysis, and self-learning mechanisms ensure continuous improvement using new data. GeoDNN is characterized by high performance when processing large volumes of geodata due to its optimized structure and parallel computations. The GeoDNN architecture is described in detail, including flowcharts, mathematical formulas, and algorithms. Processes of data preparation, their normalization and augmentation, as well as model training with parameters, optimization methods and loss functions are considered.

**Originality** is the application of deep neural networks to automate the processing of geographic data, which allows to avoid human errors, increases the accuracy of the analysis and ensures constant improvement with the use of new data.

The **practical value** of GeoDNN lies in its ability to automate the analysis of geodata, which significantly reduces processing time and reduces the need for manual labor. This makes the system efficient for use in real-world applications such as automating land parcel analysis.

**Keywords:** deep neural networks; geo dnn; geographic information systems; automated data processing; geospatial data analysis; parallel computing; neural network architecture; data normalization; data augmentation; model optimization; evaluation metrics; model accuracy; algorithm self-learning; processing efficiency; real-world applications.

УДК 621.38

ГУЛА В. С., ГРИГА В. М.

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
Івано-Франківськ, Україна

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СЕНСОРІВ ДЛЯ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ НАВІГАЦІЇ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

**Мета.** Дослідити сучасний стан інерціальних сенсорів для навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА), проаналізувати їхні переваги, недоліки, методи корекції похибок та інтеграції з іншими навігаційними системами, а також визначити перспективи розвитку та сучасні тенденції в цій галузі.

**Методика.** Проведено систематичний огляд наукової літератури, технічних документів та досліджень, що стосуються різних типів інерціальних сенсорів, їхнього застосування в навігації БПЛА, та методів злиття даних. Використано порівняльний аналіз сучасних технологій та методів до інтеграції сенсорів.

**Результати.** Систематизовано основні види інерціальних сенсорів, їхні переваги та недоліки, а також виявлено найбільш ефективні методи корекції похибок та інтеграції з іншими системами. Досліджено сучасні тенденції, такі як використання штучного інтелекту, розвиток мікроелектромеханічних систем та появу нових типів сенсорів, що сприяють підвищенню точності і надійності навігації БПЛА. Окрему увагу приділено інтеграції інерціальних вимірювальних блоків з іншими навігаційними сенсорами, такими як глобальна навігаційна супутникова система та візуальні сенсори, для забезпечення більш надійної та точної навігації. Систематизовано методи корекції похибок, такі як фільтр Калмана та адаптивні фільтри, які використовуються для підвищення точності навігаційних систем.

**Наукова новизна.** Вперше систематизовано та проаналізовано типи інерціальних сенсорів та визначено дані щодо їх переваг та недоліків у контексті вимог до навігації в сучасних навігаційних системах БПЛА.

**Практична значимість.** Отримані результати можуть бути використані для удосконалення навігаційних систем БПЛА, підвищення їхньої надійності та точності. Рекомендації щодо вибору та інтеграції сенсорів сприятимуть розвитку нових технологій у сфері безпілотних літальних апаратів.

**Ключові слова:** БПЛА; навігація; сенсор; гіроскоп; акселерометр; інерціальний вимірювальний блок; глобальна навігаційна супутникова система; сенсорне злиття.

**Вступ.** Безпілотні літальні апарати набувають дедалі більшої популярності в різних галузях, включаючи сільське господарство, логістику, оборону і наукові дослідження. Однією з ключових вимог для ефективної роботи БПЛА є точна і надійна навігація. Сучасні сенсори для навігації забезпечують можливість визначення місцезнаходження, уникнення перешкод та виконання складних маневрів у реальному часі [1–6].

Інерціальні вимірювальні блоки (IMU), що складаються з акселерометрів і гіроскопів, є основними компонентами навігаційних систем. Однак ці сенсори мають свої обмеження, зокрема, схильність до накопичення похибок із часом, що вимагає застосування методів корекції та інтеграції з іншими сенсорами для підвищення точності. З розвитком мікроелектромеханічних систем (MEMS) стали можливими більш компактні, легкі та дешеві IMU, що відкриває нові перспективи для широкого використання БПЛА [1–3, 7–12].

З розвитком технологій, таких як штучний інтелект і машинне навчання, з'являються нові підходи до обробки даних сенсорів та оптимізації навігаційних алгоритмів. Це дозволяє підвищити точність і надійність інерціальних навігаційних систем. Дослідження та інновації в цій області є актуальними і необхідними для забезпечення безпечної та ефективної роботи БПЛА в різноманітних умовах [2, 7–9, 13].

Метою цієї статті є огляд сучасних сенсорів для інерціальної навігації БПЛА, їхніх переваг, недоліків, методів корекції похибок та інтеграції з іншими системами. Особлива увага приділяється сучасним тенденціям та інноваціям, таким як використання штучного інтелекту та нових типів сенсорів. Це дослідження допоможе зрозуміти поточні досягнення та виклики, а також визначити напрями для подальших досліджень і вдосконалення технологій інерціальної навігації БПЛА.

**Постановка завдання.** Огляд основних видів інерціальних сенсорів для навігації БПЛА; аналіз їхніх переваг, недоліків і методів корекції похибок; огляд сучасних технологій; дослідження методів інтеграції з іншими навігаційними системами; прогнозування перспектив розвитку.

**Результати дослідження.** В результаті проведеного дослідження систематизовано основні типи інерціальних сенсорів, визначено їхні переваги та недоліки, а також описано ефективні методи корекції похибок та інтеграції з іншими навігаційними системами. Досліджено сучасні тенденції, такі як використання штучного інтелекту, розвиток MEMS, і поява нових сенсорних технологій. Інтеграція IMU з глобальною навігаційною супутниковою системою (GNSS) та візуальними сенсорами дозволяє значно підвищити точність і надійність навігації БПЛА.

**Визначення та класифікація безпілотних літальних апаратів.** Безпілотний літальний апарат – це дистанційно пілотований або само пілотований літальний апарат, який може нести корисне навантаження, таке як камера, радар, давач і комунікаційне обладнання [3, 5, 6].

БПЛА бувають двох основних типів: з фіксованим крилом і пропелерами. Апарати з фіксованим крилом, працюють аналогічно до легких безпілотних літаків. Гвинтокрилі БПЛА, які також називають мультироторними, гвинтокрилами або мультикоптерами залежно від їхньої конструкції, схожі на легкі безпілотні вертольоти [14]. На ринку доступні БПЛА з різною кількістю роторів або пропелерів [5].

Існують апарати з різними двигунами та конструкціями крила. БПЛА можуть зв'язуватися за допомогою бездротових технологій як короткого, так і довгого радіусу дії, а їхні розміри можна класифікувати як нано-, мікро- або великі. Дрони оснащені окулярами з видом від першої особи (FPV), системою глобального позиціонування (GPS), давачами, стабілізаторами та камерами, що дозволяє забезпечувати мобільний зв'язок [5].

Гвинтокрилі БПЛА (VTOL) можуть злітати і приземлятися вертикально, що робить їх зручними для використання в обмежених просторах без злітно-посадкової смуги. Натомість БПЛА (HTOL) з фіксованим крилом потребують злітно-посадкової смуги, але вони енергоефективніші та мають довшу тривалість польоту. Головною перевагою VTOL є здатність створювати підйомну силу в нерухомому стані, що забезпечує більшу маневреність і контрольованість порівняно з HTOL, які потребують руху для створення підйомної сили [14]. Деякі приклади БПЛА з фіксованим і роторним крилом показані на рис. 1, 2 і 3.

Крім того, виділяють БПЛА із гібридним крилом, що об'єднує в собі переваги фіксованого та роторного крил [18, 19]. Приклад такого БПЛА наведено на рис. 4.

На додаток до класифікації за конфігурацією, існує безліч інших схем класифікації. Міністерство оборони США використовує 5 класів, заснованих на вазі, швидкості та висоті польоту (табл. 1) [14, 20].

БПЛА також іноді класифікують за витривалістю та висотою польоту: MAV (мікро- або мініатюрні літальні апарати), NAV (нано-літальні апарати), VTOL (вертикальний зліт і посадка), LASE (низька висота, коротка витривалість), LALE (низька висота, довга витривалість), MALE (середня висота, довга витривалість) і HALE (висока висота, довга витривалість) [14].



Джерело: [15].

Рис. 1. БПЛА із фіксованим крилом – RQ-4 Global Hawk



Джерело: [16].

Рис. 2. БПЛА із фіксованим крилом – SHARK UAS



Джерело: [17].

Рис. 3. БПЛА з роторним крилом – DJI Matrice 350 RTK



Джерело: [19].

Рис. 4. БПЛА із гібридним крилом – FDG50F

Таблиця 1

**Класи БПЛА, що використовуються Міністерством оборони США**

Категорія	Розмір	Максимальна підйомна маса, кг	Висота роботи, м	Швидкість, м/с
Клас 1	Small	0–9	<366	<51,4
Клас 2	Medium	9–25	<1067	<128,6
Клас 3	Large	<600	<5486	<128,6
Клас 4	Very-Large	>600	<5486	Будь-яка
Клас 5	Very-Large	>1320	>5486	Будь-яка

**Інерціальна навігація.** Навігаційна система БПЛА – це система, яка визначає положення літального апарату відносно деякої системи відліку (тобто ситуаційна обізнаність). Тимчасова втрата або відсутність ситуаційної обізнаності є причиною багатьох авіаційних аварій [3]. Така система побудована відповідно до другого закону Ньютона [13]. Інерціальна навігація була розроблена кілька десятиліть тому для військових застосувань, таких як ракети, літаки і кораблі, за допомогою інерціальних давачів, включаючи акселерометри і гіроскопи [2].

Інерціальні сенсори вимірюють інерціальні прискорення та обертання, які є векторними величинами [1]. Сенсор – це пристрій, який перетворює фізичне явище на електричний сигнал [4].

**Принцип роботи інерціальних навігаційних систем (INS).**

**Інерціальна навігація** – це автономний метод навігації, в якому вимірювання використовуються для відстеження положення та орієнтації об'єкта відносно відомої початкової точки, орієнтації та швидкості. Два пристрої, що застосовуються для інерціальної навігації: акселерометри і гіроскопи [3]. Прилад, що використовує ці пристрої має назву інерціальний вимірювальний блок (IMU) [21]. Обробляючи сигнали від IMU, можна обчислити положення та орієнтацію об'єкта автономно [3].

Пристрої для вимірювання обертання або швидкості обертання в сукупності називаються *гіроскопами* [1]. *Гіроскоп* – це механічний давач, який підтримує кутовий момент і використовується для вимірювання зміни положення і/або швидкості руху БПЛА [3].

*Акселерометр* – це вимірювальний пристрій для вимірювання лінійного прискорення руху. Кінцевою змінною польоту, яка виводиться з вихідного сигналу акселерометра, є лінійна швидкість [3].

**Класифікація IMU.** IMU поділяються на два типи: зі стабільною платформою і безплатформні (жорстко закріплені), структуру яких схематично зображено на рис. 5. У системах зі стабільною платформою INS ізолювана від зовнішніх рухів і вимірює в глобальній системі координат. У безплатформних системах INS кріпиться на БПЛА, вимірюючи в каркасі корпусу. Безплатформні системи менш складні механічно, менші за розміром, але мають вищу обчислювальну складність, яка стала прийнятною завдяки зниженню вартості обчислень. Вони стали домінуючим типом IMU, хоча стабільні платформні INS все ще використовуються [3, 9].

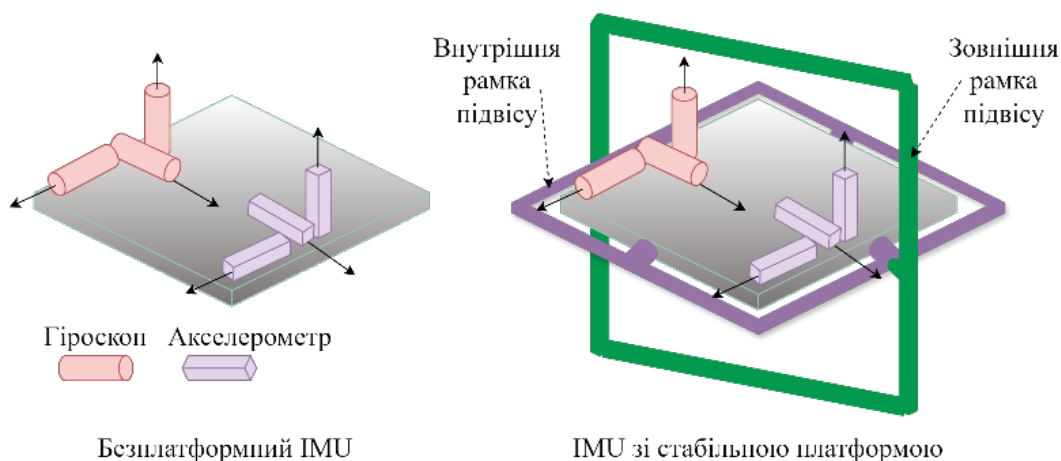


Рис. 5. Структура інерціальних вимірювальних блоків

IMU включають в себе вищезгадані інерціальні сенсори і пов'язану з ними допоміжну електроніку та пристрої для калібрування сенсорів і керування ними [1]. На рис. 6 зображено схематично роботу інерціальної системи навігації [22].

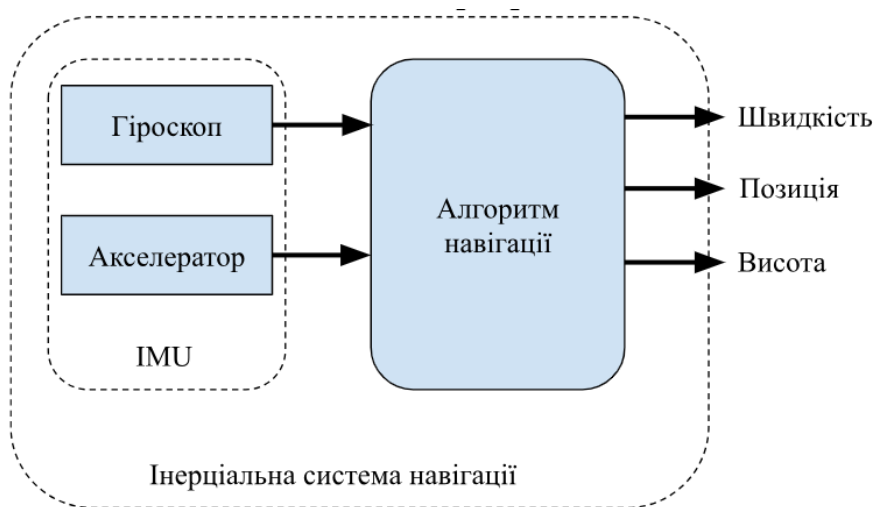


Рис. 6. Схема інерціальної системи навігації

Традиційні *гіроскопи* виготовляються з обертових коліс, але прогрес у мікроелектромеханічних системах призвів до появи нових мікрогіроскопів, які не мають обертових коліс. Гіроскопи MEMS вимірюють зміни сил, що діють на дві однакові маси, які коливаються і рухаються в протилежних напрямках. Іншим вдосконаленим типом гіроскопів є оптичний гіроскоп на кристалі без рухомих частин і з більшим ступенем точності, що використовує явище, яке називається ефектом Sagnac [3].

Сучасні *акселерометри* включають в себе величезну кількість різноманітних сенсорів, які використовують різні принципи роботи і технології. Вони включають механічні давачі, які використовують класичний принцип маятника, до сучасних твердотільних сенсорів. Отже, акселерометри існують в широкому діапазоні точності [9].

Останні досягнення в галузі конструювання MEMS дозволили виготовляти малогабаритні та легкі інерціальні навігаційні системи [3].

**Сенсорні технології та гіроскопи.** Моментні колісні гіроскопи (рис. 7) в основному працюють за допомогою маси, що швидко обертається [9].

Сучасні давачі кутової швидкості відрізняються за технологіями та принципами роботи, що, в свою чергу, відображається на їх точності. До давачів кутової швидкості належать гіроскопи на механічній основі, модернізовані для використання в безплатформних INS, такі як гіроскопи з динамічним налаштуванням (DTG – Dynamically tuned gyroscopes), а також гнучкі гіроскопи [9].

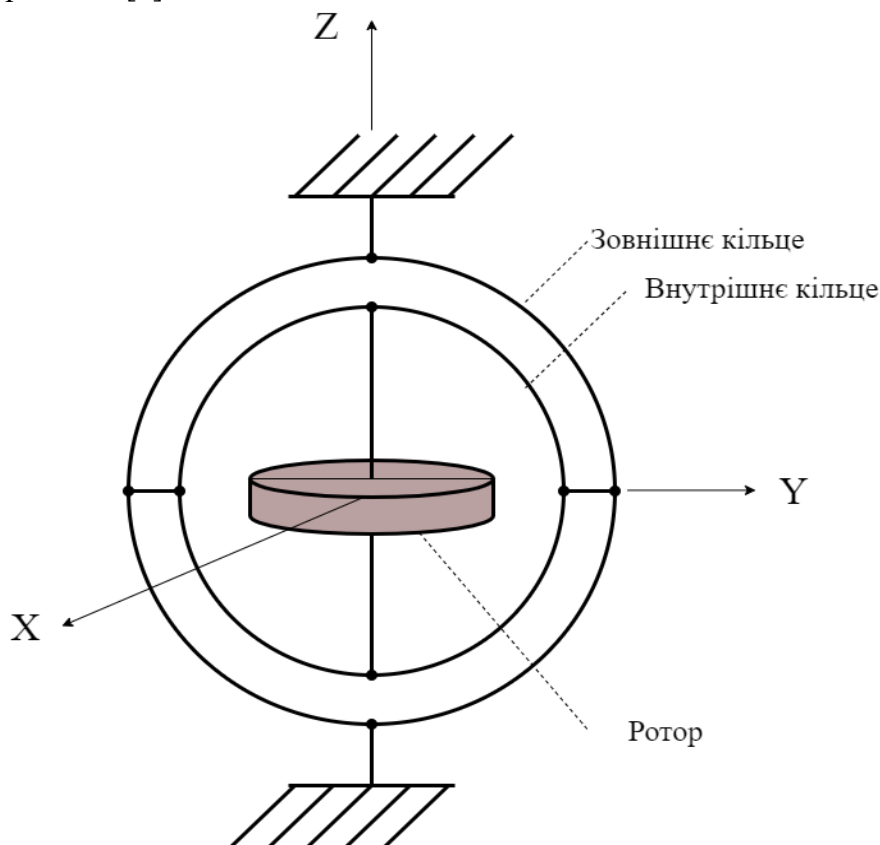


Рис. 7. Схематичне зображення механічного колісного гіроскопу

Інша технологія виготовлення давачів кутової швидкості – *вібраційні гіроскопи*. Принцип дії вібраційних гіроскопів був відкритий Фуко. Вібраційний елемент може мати різні форми, такі як: струна, порожнистий циліндр, стрижень, камертон (рис. 8), балка, напівсферичний купол [9].

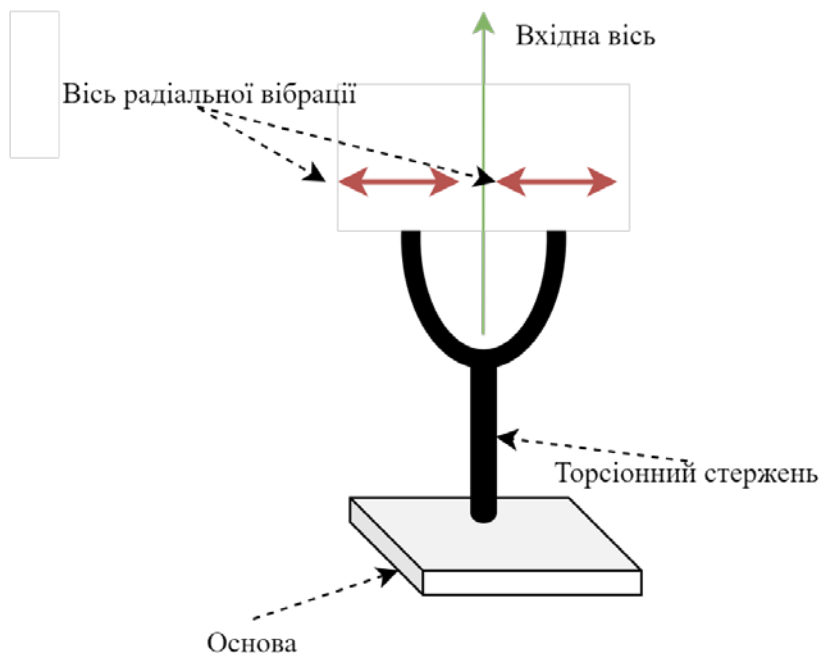


Рис. 8. Схематичне зображення вібраційного гіроскопу камертона

Вібраційні гіроскопи характеризуються можливістю мініатюризації та масового виробництва за відносно низької вартості. Отже, вібраційні гіроскопи можна розглядати як базову технологію, на основі якої виробляються *гіроскопи на основі мікроелектромеханічних систем*. Однак вібраційні гіроскопи можуть характеризуватися високими швидкостями дрейфу, обмеженнями вхідного діапазону гіроскопів через обмеження власної частоти резонатора (тобто вібраційного елемента) і чутливістю до впливу навколишнього середовища, таких як температурні коливання і удари [9].

Однією з найбільш ефективних і точних технологій у виробництві гіроскопів є *оптичні гіроскопи*. Принцип дії оптичних гіроскопів ґрунтується на ефекті Саньяка [3]. Ефект Саньяка [3] полягає в тому, що для інтерферометра із замкнутим контуром фаза світла, що проходить всередині інтерферометра, пропорційна зовнішній кутовій швидкості, якій він піддається. Оптичні гіроскопи можуть бути реалізовані в багатьох формах, найефективнішими з яких є кільцеві лазерні гіроскопи (RLG), які представляють активну архітектуру оптичного гіроскопа, і волоконно-оптичні гіроскопи (FOG), які представляють пасивну архітектуру оптичного гіроскопа [9].

В табл. 2 наведено порівняльний аналіз характеристик основних типів сенсорних технологій, що реалізують гіроскоп.

Таблиця 2

**Характеристики основних типів сенсорів гіроскопів**

	<b>Принцип роботи</b>	<b>Переваги</b>	<b>Недоліки</b>	<b>Застосування</b>
Моментні колісні гіроскопи	Використовують обертання маховика для контролю моменту інерції	Висока точність, керування рухом великих об'єктів	Велика маса, складність системи, потребує значної енергії	Супутники, космічні апарати
Механічні гіроскопи	Вимірювання обертання за допомогою механічних елементів	Висока точність, стійкість до зовнішніх впливів	Великі розміри, маса, механічні зноси	Аерокосмічна техніка, судноплавство

Продовження табл. 2

	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Застосування
Вібраційні гіроскопи	Використовують вібрації елементів для вимірювання обертання	Висока точність, компактність, відносно низька вартість	Чутливість до механічних збурень, середня точність	Автомобільна техніка, робототехніка, портативні пристрої
MEMS гіроскопи	Використовують ефект Коріоліса для вимірювання обертання	Компактність, низька вартість, низьке енергоспоживання	Нижча точність, чутливість до шумів	Смартфони, БПЛА, автомобільна техніка
Кільцеві лазерні гіроскопи	Застосовує явище інтерференції двох променів лазера	Висока точність, надійність	Висока вартість, складність конструкції	Літаки, ракети, супутники
Волоконно-оптичні гіроскопи	Використовує інтерференцію світлових хвиль у волоконно-оптичному кабелі	Висока точність, відсутність рухомих частин, тривала робота	Висока вартість, чутливість до температурних змін	Високоточні навігаційні системи
Квантові гіроскопи	Використовує квантові ефекти для вимірювання обертання	Надвисока точність, не потребує калібрування	Дуже висока вартість, експериментальний етап	Наукові дослідження, перспективні навігаційні системи

**Сенсорні технології та акселерометри.** Сучасні акселерометри включають механічні давачі, які використовують класичний принцип маятника, до сучасних твердотільних сенсорів. Механічні акселерометри можна вважати найвищим рівнем точності з точки зору інерціальних давачів. Тим не менш, механічні акселерометри можуть бути реалізовані в різних формах з різною конструкцією. Іншою формою лінійних акселерометрів є акселерометри, які використовують твердотільні технології [9].

Найпопулярнішим класом акселерометрів є *п'єзоелектричний акселерометр*. Цей тип сенсорів здатний вимірювати широкий спектр динамічних подій. Однак існує багато інших класів акселерометрів, які використовуються для вимірювання постійних або дуже низькочастотних прискорень, таких як автомобільне гальмування, якість їзди в ліфті і навіть гравітаційне тяжіння Землі. Такі акселерометри використовують *п'єзорезистивні, ємнісні та сервотехнології* [4].

*П'єзоелектричні акселерометри* – це пристрої, що характеризуються розширеною ділянкою плоскої АЧХ, великим діапазоном лінійної амплітуди і чудовою довговічністю. Ці властивості обумовлені використанням п'єзоелектричного матеріалу в якості чутливого елемента сенсора. П'єзоелектричні матеріали характеризуються здатністю видавати електричний сигнал, пропорційний напрузі, прикладеному до матеріалу [4].

П'єзоелектричні акселерометри вже давно використовуються для вимірювання вібраційного прискорення і застосовуються в основному як давачі постійного струму в п'єзоелектричних конденсаторах на пучкових акселерометрах MEMS [1].

Дві категорії п'єзоелектричних матеріалів, які переважно використовуються в конструкції акселерометрів, – це кварц і полікристалічна кераміка. Кварц – це природний

кристал, тоді як кераміка – штучний. Кожен матеріал має певні переваги. Вибір матеріалу залежить від конкретних характеристик, яких бажають досягти від акселерометра [4].

Існує безліч механічних конфігурацій для реалізації принципів перетворення п'єзоелектричного акселерометра. Ці конфігурації визначаються характером дії інерціальної сили прискореної маси на п'єзоелектричний матеріал. Сьогодні використовуються три основні конфігурації: зсув, згинання та стиснення [4].

*П'єзорезистивні акселерометри* використовують зміну опору в напруженому опорному матеріалі. П'єзорезистивні акселерометри MEMS, що використовуються для розкриття автомобільних подушок безпеки, використовують п'єзорезистентність [1]. Часто для виробництва такого типу акселерометрів використовується монокристалічний кремній [4].

До переваг акселерометра, сконструйованого таким чином, належить висока жорсткість, що призводить до високої резонансної частоти, яка оптимізує його частотну характеристику. Ця висока резонансна частота досягається завдяки тому, що квадратний корінь з відношення модуля до густини кремнію, показника динамічних характеристик, є вищим, ніж у сталі. Іншими перевагами є мініатюризація, велика амплітуда сигналу (напівпровідникові тензорезистори мають коефіцієнт вимірювання в 25–50 разів більший, ніж металеві), хороша лінійність і підвищена стабільність. За умови належної температурної компенсації п'єзорезистивні акселерометри можуть працювати в діапазоні температур від  $-65$  до  $+250^{\circ}\text{F}$ . За сучасних технологій інші типи п'єзорезистивних давачів (тиску) можуть працювати при температурі до  $1000^{\circ}\text{F}$  [4].

*Ємнісні акселерометри* схожі за принципом дії на п'єзорезистивні акселерометри; однак замість зміни опору вони вимірюють зміну ємності. Чутливий елемент складається з двох паралельних пластинчастих конденсаторів, що працюють в диференціальному режимі. Ці конденсатори працюють у мостовій конфігурації і залежать від схеми демодулятора несучої або її еквівалента, щоб виробляти електричний вихід, пропорційний прискоренню [4].

Ємнісні MEMS-акселерометри наразі працюють з прискореннями до сотень  $g$  і частотами до одного кГц. Технологія MEMS також дозволяє зменшити розмір акселерометра [4].

Однією з основних переваг ємнісних акселерометрів є вимірювання низького рівня (менше  $2 g$ ), низькочастотного прискорення зі здатністю витримувати високі рівні ударів, як правило,  $5000 g$  або більше. Деякі з недоліків ємнісного акселерометра – обмежений високочастотний діапазон, відносно великий фазовий зсув і вищий рівень шуму, ніж у порівнянних п'єзоелектричних пристроїв [4].

До *твердотільних технологій* належить реалізація оптичних акселерометрів, таких як *вібраційні волоконно-оптичні акселерометри*. Такі оптичні акселерометри передбачають використання волоконної оптики у виготовленні акселерометрів і використовують різні підходи та конструкції для отримання прикладеного прискорення до давача від вимірювання властивостей світла, що проходить через різні конструкції волоконно-оптичних кабелів. Твердотільні технології дозволяють створювати невеликі, надійні та відносно дешеві інерціальні давачі [9].

Для *лінійних акселерометрів на основі рідини* ця підкатегорія включає акселерометри з в'язким поплавком, акселерометри з приводом від тиску і термоакселерометри з мікромеханічним приводом. Загальним обмеженням в'язких поплавкових акселерометрів є теплові коливання, які мають великий вплив на в'язкість рідини, що впливає на вихідний сигнал давача [9]. В табл. 3 систематизовано характеристики сенсорних технологій, що використовуються в сучасних акселерометрах.

Таблиця 3

**Характеристики основних типів сенсорів акселерометрів**

	<b>Принцип роботи</b>	<b>Переваги</b>	<b>Недоліки</b>	<b>Застосування</b>
П'єзоелектричні акселерометри	П'єзоелектричний ефект, при якому під тиском генерується електричний заряд	Висока точність, широкий динамічний діапазон, стабільність	Неможливість вимірювання постійного прискорення, чутливість до температури	Вібраційний аналіз, вимірювання ударів
П'єзореzystивні акселерометри	Зміна електричного опору п'єзореzystивного матеріалу під дією механічних навантажень	Широкий діапазон вимірювань, стійкість до ударних навантажень	Вища споживана потужність, ніж у ємнісних акселерометрів	Автомобільна техніка, краш-тести
Ємнісні акселерометри	Зміна ємності між рухомими та нерухомими електродами під дією прискорення	Низька вартість, низька споживана потужність, здатність вимірювати статичні прискорення	Низька точність порівняно з іншими типами акселерометрів	Смартфони, системи стабілізації камер
Вібраційні волоконно-оптичні акселерометри	Вимірювання змін у фазі світлових хвиль, що проходять через оптичні волокна	Висока точність, нечутливість до електромагнітних перешкод	Висока вартість, складність інтеграції	Високоточні вимірювання, військові застосування
Лінійні акселерометри на основі рідини	Вимірювання зміщення рідини під дією прискорення	Висока точність, стабільність у часі	Відносно повільний час реакції	Геофізика, буріння свердловин

**Нові типи інерціальних сенсорних технологій.** Фізичним явищем, що визначає роботу гіроскопів ядерного магнітного резонансу (NMR), є квантовий спіт ядер атомів [9].

NMR-гіроскопи досягли значного розвитку в основних аспектах своєї конструкції та реалізації. Зокрема, наукові досягнення призвели до вдосконалення методів керування атомним спіном, прикладеним магнітним полем, а також до розробки кращих механізмів реєстрації сигналу гіроскопа [9].

Вважається, що NMR-гіроскопи наближаються до навігаційних вимог з точки зору бюджету похибки. Крім того, на NMR-гіроскопи не впливають вібрації, оскільки механізм передачі руху таких давачів не потребує твердої маси. Підсумовуючи, очікується, що технологія NMR-гіроскопів досягне високого рівня точності у високодинамічних додатках протягом десятиліття [9].

Ще одна новітня технологія, яка була впроваджена у виробництві інерціальних давачів – це *технологія холодних атомів* (cold atom inertial sensors). Холодноатомні інерціальні сенсори покладаються на лазерне охолодження атомів, без криогенного охолодження [9].

Інерціальні сенсори на холодних атомах характеризуються високою продуктивністю порівняно з типовими оптичними гіроскопами, оскільки ефективна довжина хвилі атомів менша, ніж у RLG і FOG на десять порядків. Крім того, завдяки низькій температурі

захоплених холодних атомів, вони забезпечують вимірювання з низьким рівнем шуму і високим відношенням сигнал/шум порівняно з оптичними інерціальними сенсорами [9].

На відміну від інерціальних давачів на основі MEMS, які використовують ємнісні – механізми зчитування, з'явився новий метод, відомий як *мікро-оптоелектромеханічні системи (MOEMS)* (рис. 9). IMU на основі MEMS зазвичай включають електронні ємнісні засоби, за допомогою яких рух мікроінерціальної сейсмічної маси виявляється і перетворюється в сигнали. Однак, інерціальні давачі на основі MOEMS використовують оптичні механізми зчитування, які усувають широкий спектр помилок, що виникають у давачах на основі MEMS. Давачі MOEMS оптимізовані для досягнення низької вартості виробництва при досягненні високої точності [9].

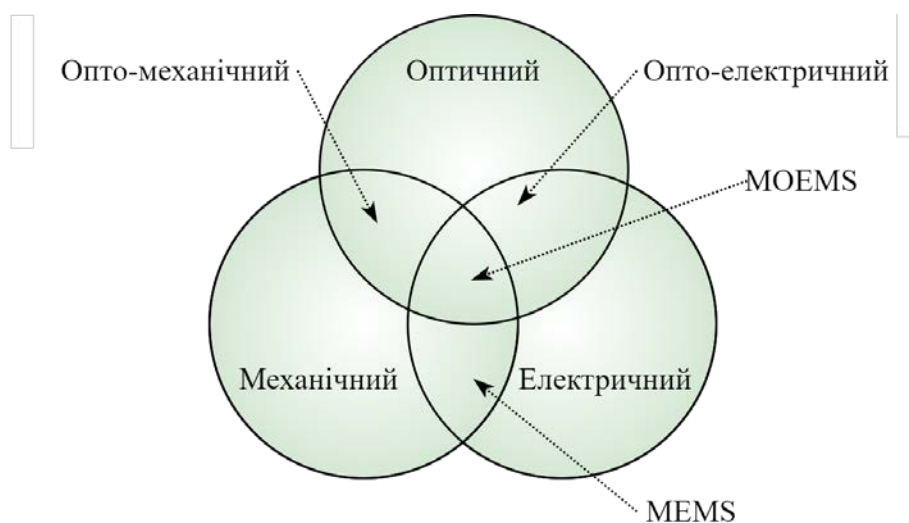


Рис. 9. Типи технологій інерціальних сенсорів

Нещодавно дослідницька група «Мобільні мультисенсорні системи» в Університеті Калгарі розробила технологію інерціальних давачів на основі рідини, що розробляється в рамках проекту «Мобільні мультисенсорні системи» [9]. Дослідження пропонує інерціальну навігаційну систему на основі рідини, яка називається *інерціальною навігаційною системою велосиметрії з візуалізацією частинок (PIVINS)*, що залежить від динаміки рідини для забезпечення інерціальних вимірювань [9]. На рис. 10 зображено схематично гіроскоп на базі даної технології.

Тривають дослідження, спрямовані на створення повнофункціональної інерціальної навігаційної системи. PIVINS є майже бездрейфовою інерціальною навігаційною системою з незначною нестабільністю зсуву. Таким чином, PIVINS має лише методичні похибки, які можна змоделювати, або аналітично, або експериментально. Отже, PIVINS на кожному рівні можна порівняти з висококласними тактичними системами, але при цьому вона є надзвичайно ефективною з точки зору нестабільності зсуву. Очікується, що PIVINS досягне такого рівня продуктивності завдяки простій і недорогій конструкції [9].

*Технологія напівсферичного резонаторного гіроскопа (HRG)* ґрунтується на тих самих наукових принципах, що й у вібраційних гіроскопах, про які йшлося раніше. HRG залежить від сили Коріоліса при визначенні вхідної кутової швидкості. Отже, технологія HRG лежить в межах більш специфічної таксономії гіроскопів, яка називається «вібраційні гіроскопи Коріоліса». Основний науковий принцип полягає в тому, що об'єкт, який резонує на заданій частоті, залишається резонуючим у тій самій площині, навіть якщо його опори обертаються [9]. В табл. 4 наведено порівняльний аналіз досліджених сенсорних технологій.

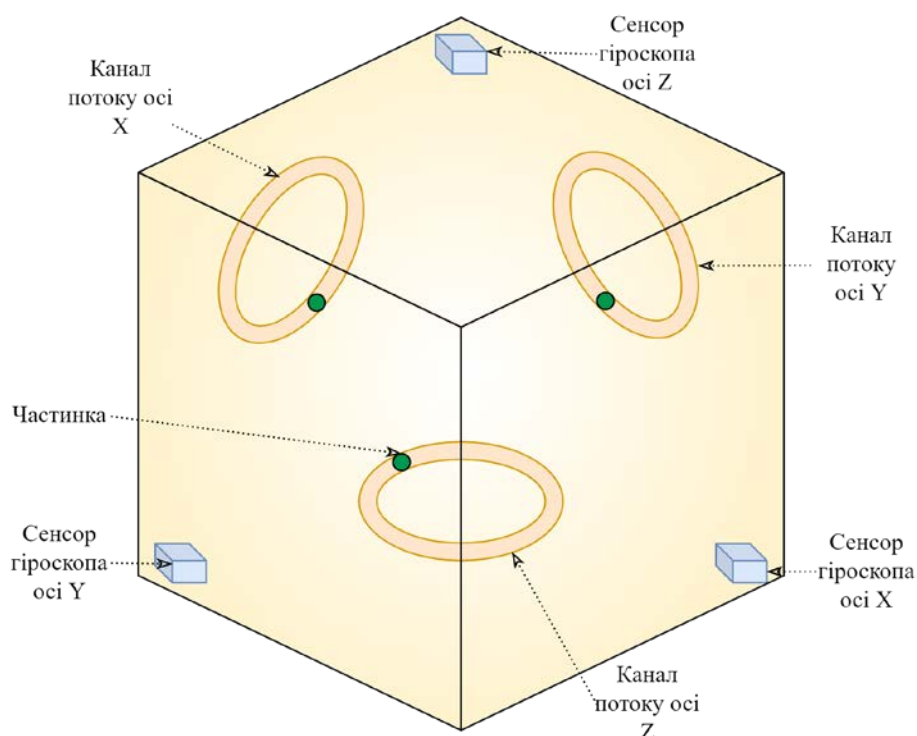


Рис. 10. Схема будови гіроскопа велосиметрії з візуалізацією частинок

Таблиця 4

**Характеристики новітніх сенсорних технологій**

	<b>Принцип роботи</b>	<b>Переваги</b>	<b>Недоліки</b>	<b>Застосування</b>
Гіроскопи ядерного магнітного резонансу	Використовує ядерний магнітний резонанс для вимірювання обертання	Надзвичайно висока точність, низька чутливість до шуму	Висока вартість, вимагає спеціальних умов	Аерокосмічна галузь, дослідження космосу
Мікро-опто-електромеханічні системи (МОEMS)	Інтегрує оптичні, електронні та механічні компоненти для вимірювання прискорення та обертання	Компактний розмір, відносно низька вартість	Нижча точність порівняно з деякими іншими технологіями	Портативні пристрої, автомобільна навігація
Технологія холодних атомів	Використовує холодні атоми для досягнення надзвичайно високої точності вимірювання прискорення та обертання	Виняткова точність, мінімальний шумовий вплив	Надзвичайно висока вартість, складна в експлуатації	Наукові дослідження, високоточна навігація
Інерціальні давачі для велосиметрії з візуалізацією частинок	Вимірює швидкість частинок у рідинах для визначення прискорення та обертання	Висока точність у специфічних сферах застосування	Висока вартість, обмежена рідкими середовищами	Дослідження гідродинаміки, аеродинаміка
Технологія напівсферичного резонаторного гіроскопа (HRG)	Використовує напівсферичні резонатори для вимірювання обертання	Висока точність, стійкість до механічних впливів	Висока вартість, складна конструкція	Космічні апарати, авіація

**Переваги та недоліки інерціальних систем.** Інерціальні давачі поділяються за своїми характеристиками на різні класи, які відрізняються відповідною вартістю та сферою застосування. Основою, на якій будується класифікація IMU, є похибки, що виникають у їхніх вихідних вимірюваннях. Такі похибки різняться між інерціальними давачами з точки зору їхньої природи – методичні чи випадкові похибки [9].

Інерціальна навігаційна система дозволяє вимірювати рух БПЛА пасивно, тобто без використання зовнішніх елементів управління. Перевагами INS систем є автономність, не залежить від будь-якого зовнішнього пристрою і не потребує умов видимості [23].

Значним недоліком є помилки в обчисленнях, що зростають з часом. Це зумовлено тим, що такі системи дуже чутливі до помилок у вимірюваннях. Ці помилки накопичуються в часі, що призводить до неправильного визначення позиції та орієнтації об'єкта [2, 4, 14].

Високоякісні IMU є дуже дорогими, а недорогі IMU на основі MEMS страждають від значного дрейфу в часі [1]. Однак для зменшення впливу помилок на навігаційну систему можна використовувати комбіновані методи навігації, що інтегрують інші методи з INS [2, 7, 8].

**Комбіновані методи навігації.** Один сенсор не може впоратися з усіма викликами, такими як накопичення помилок INS, уразливість GNSS до перешкод та обмеження візуальної одометрії. Впровадження обчислювальних можливостей БПЛА дозволяє об'єднувати дані з різних сенсорів, що підвищує надійність і адаптивність навігаційної системи завдяки комплементарному підходу [2, 8]. Інерціальні сенсори для навігації можливо інтегрувати з іншими технологіями для навігації за допомогою злиття даних. Зокрема, GNSS, WiFi, Bluetooth, RFID, UWB, Ultrasonic, Magnetic, Vision, LiDAR [2].

Після більш ніж 30 років розвитку структура навігаційної системи злиття даних стає все більш зрілою, яку можна розділити на фільтрову (Filter-Based Framework), нелінійну оптимізацію (Optimization-Based Framework) та машинне навчання (Deep AI-Based Algorithmic Framework) [2, 7, 8]. На рис. 11 зображено класифікацію аналітичних методів до яких належать фільтрові та нелінійні оптимізації.

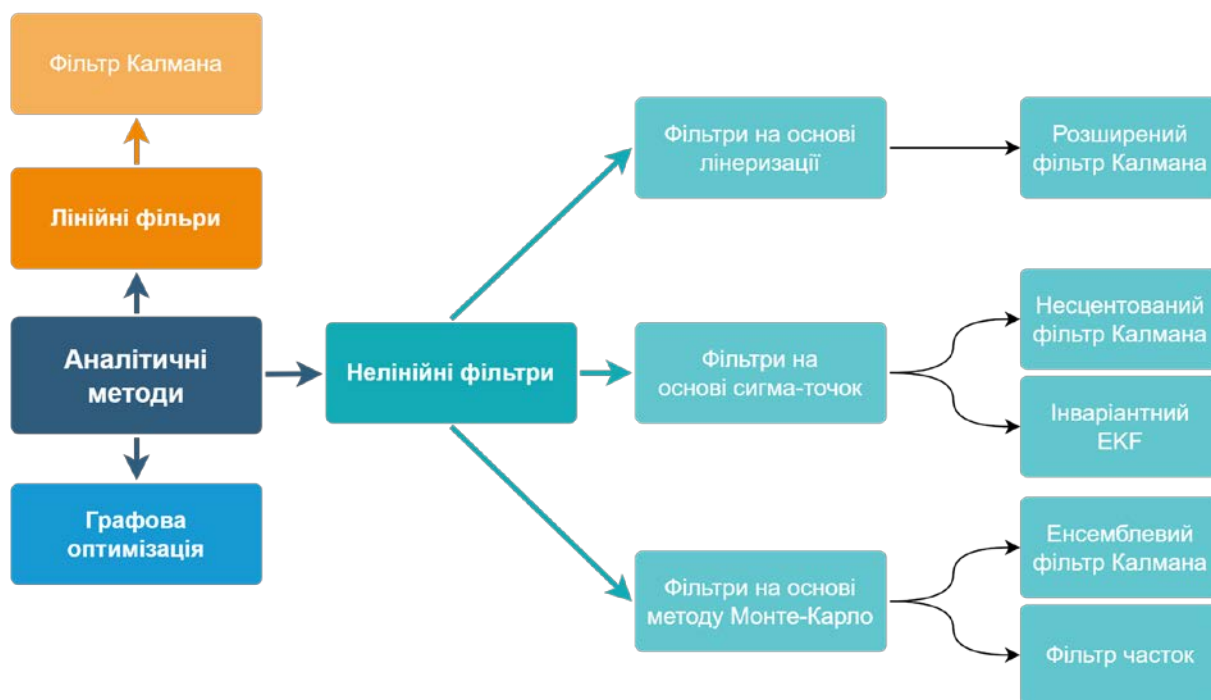


Рис. 11. Класифікація аналітичних методів для інтеграції сенсорних даних

**Фільтрове злиття даних сенсорів.** Інтеграція GNSS/INS є класичною структурою злиття, яка включає слабко, тісно, і глибоко зв'язані підходи. *Фільтр Калмана* є рекурсивним фільтром для оцінки стану динамічної системи з неповних і зашумлених вимірювань, широко використовується в інтегрованій навігації. Він працює на основі Гаусівського розподілу і лінійності системи. Недолік GNSS/INS полягає у залежності від точності та частоти GNSS; коли видимих супутників менше 4, система деградує до режиму INS [2, 7, 8].

*Розширений фільтр Калмана (ЕКФ)* адаптує нелінійні системи, лінеаризуючи їх за допомогою розкладу в ряд Тейлора. ЕКФ використовується у багатьох статтях для інтеграції GNSS/INS [2, 7].

*Беззапаховний фільтр Калмана (УКФ)* пропонує кращу продуктивність за рахунок обчислювального часу, використовує спеціальний набір сигма-точок для оцінки стану системи [7].

*Інваріантний ЕКФ (InЕКФ)* поєднує теорію збереження симетрії з ЕКФ, забезпечуючи точнішу оцінку стану системи тому, що некоректні стани не впливають на точність лінеаризації, тому порівняно зі стандартним ЕКФ, заснованим на формі похибки, InЕКФ має кращу точність і узгодженість [8].

*Фільтр часточок (PF)* використовує метод Монте-Карло для моделювання будь-якого стану, на відміну від KF, який працює з лінійними системами і Гаусівськими шумами [2].

*Ансамблевий фільтр Калмана (EnKF)* використовує стохастичну вибірку на основі методу Монте-Карло для обчислення коваріаційної матриці стану, що зменшує обчислювальну складність і покращує продуктивність для високопорядкових нелінійних систем [2].

Таблиця 5

**Характеристики аналітичних методів злиття сенсорних даних**

	Точність	Обчислювальна складність	Обробка нелінійності	Стійкість до шуму	Переваги	Недоліки
Фільтр Калмана	Висока	Низька	Слабка	Висока	Оптимальний для лінійних систем, реальний час обробки	Погана продуктивність у нелінійних системах
Розширений фільтр Калмана (ЕКФ)	Помірна до високої	Помірна	Помірна	Помірна	Може обробляти деяку нелінійність, широко використовується	Лінеаризація може вносити помилки, обмежений для гладкої нелінійності
Беззапаховий фільтр Калмана (УКФ)	Висока	Помірна до високої	Добре	Висока	Краще обробляє сильну нелінійність, точні результати	Складніший і обчислювальний витратний, ніж ЕКФ
Інваріантний ЕКФ	Висока	Помірна	Помірна	Висока	Підтримує інваріантність, стійкий до певних перетворень	Складність реалізації та розуміння

Продовження табл. 5

	Точність	Обчислювальна складність	Обробка нелінійності	Стійкість до шуму	Переваги	Недоліки
Фільтр часточок	Висока	Висока	Відмінна	Помірна до високої	Обробляє сильну нелінійність та багатомодальні розподіли	Обчислювально витратний, потребує великої кількості часток
Ансамблевий фільтр Калмана (EnKF)	Висока	Висока	Добре	Висока	Масштабований до високо-розмірних систем, ефективний для великих моделей	Обчислювально вимогливий, розмір ансамблю впливає на продуктивність

**Нелінійна оптимізація.** Задача об'єднання інформації з декількох джерел у навігаційних системах полягає у визначенні максимального апостеріорного значення стану системи за допомогою Байєсівських графових мереж [2]. Графові оптимізаційні методи використовуються для опису взаємозв'язків у навігаційних системах, особливо в задачах візуально-інерціального SLAM. Вони також застосовуються в LiDAR-INS, GNSS/INS, GNSS/INS/Vision, та Visual/INS системах. Порівняно з фільтраційними алгоритмами, методи оптимізації забезпечують кращу точність за рахунок врахування попередніх станів системи, але потребують більше обчислювальних ресурсів [2, 7, 8, 13, 21, 24, 25].

**Методи машинного навчання.** Залежать від точності ініціалізації та даних сенсорів. Нелінійна оптимізація краща для складних задач, але методи глибокого навчання отримують все більше уваги за здатність до нелінійного застосування [8].

*Artificial neural network (ANN)* використовується для прогнозування координат або помилок INS під час збоїв GNSS. Переваги: об'єднання даних без моделі системи, прогнозування в нелінійних системах, ефективність з великими даними. Недоліки: «чорна скринька», потреба у великій кількості даних, складність забезпечення невизначеності результатів [2].

*Fuzzy logic* є простою системою, що використовує експертні знання та може моделювати шуми процесу та вимірювань без необхідності їх імовірнісних характеристик. Проблеми: не завжди точне обґрунтування, результати на основі припущень, потреба у широких випробуваннях [2].

*Support vector machine (SVM)* має високу здатність до узагальнення, адаптивність до різних середовищ, робота з даними високої розмірності, уникнення локальних мінімумів. Проблеми: зростання часу обчислень з великими даними, зниження ефективності при високому рівні шуму [2].

*Random forest* не чутливий до аномальних даних, ефективно обробляє дані з високою розмірністю, уникає надмірної підгонки. Проблеми: потреба у багатьох деревах рішень для складних задач, низька ефективність обчислень, слабка інтерпретованість при великому масштабі [2].

Надійність і стійкість багатоджерельних навігаційних систем є ключовою метою розробки БПЛА. Кожен давач має свої унікальні застосування та обмеження. Наприклад, GNSS працює тільки на відкритих просторах, тоді як камери технічного зору і лазерні

далекоміри мають проблеми в темних або динамічних умовах, а магнітометри чутливі до магнітних перешкод. Об'єднання даних з різних сенсорів підвищує надійність системи [2, 7, 8].

Таблиця 6

Характеристики методів машинного навчання

	Точність	Обчислювальна складність	Обробка нелінійності	Стійкість до шуму	Переваги	Недоліки
Artificial Neural Network	Висока	Висока	Відмінна	Висока	Добре справляється з нелінійними даними, висока точність	Потребує великих обсягів даних для навчання
Fuzzy Logic	Середня до високої	Низька	Добре	Середня	Може працювати з нечіткими даними, легкість в інтерпретації	Може бути менш точною, особливо у складних системах
Support Vector Machine	Висока	Помірна	Добре	Висока	Висока точність у невеликих обсягах даних, стійкість до перенавчання	Погано масштабується на великі набори даних, чутливість до вибору ядра
Random Forest	Висока	Помірна	Добре	Висока	Висока стійкість до перенавчання, добре справляється з пропущеними даними	Обчислювально витратний для великих наборів даних

IMU не залежить від зовнішніх сигналів, але вразливий до шумів і з часом втрачає точність. Комбінація GPS та IMU покращує позиціонування, а фільтр Калмана часто використовується для злиття даних. Інтеграція GNSS/INS є поширеною, забезпечуючи стабільність і точність навіть при короткочасних відключеннях сигналу GNSS. Проте, тривалі відключення сигналу знижують точність системи через дрейф IMU. Інтеграція GNSS/INS/LiDAR SLAM також досліджується для підвищення точності та надійності [2, 21].

Детальний огляд різноманітних методів інтеграції та комбінацій джерел даних є предметом подальших досліджень.

**Перспективи подальших досліджень.** У відносно ідеальному середовищі методи на основі фільтрів і оптимізації можуть забезпечити високу точність результатів, однак у складних умовах надійність є великим викликом для алгоритму злиття. У майбутньому розробка повинна зосередитися на наступних аспектах [8]:

- покращення якості даних: підвищення точності MEMS IMU, зменшення помилок калібрування, покращення даних у динамічних умовах, зменшення розмиття візуальних камер;
- використання гетерогенних сенсорів: різні сенсори для різних середовищ, такі як камери глибини та камери подій для вирішення специфічних проблем;

- розробка відмовостійких архітектур: забезпечення надійності системи через виявлення помилок і зменшення складності;

- підходи на основі даних: використання DNN для вирішення проблем моделювання та динаміки середовища, забезпечення безпеки та надійності автономних систем.

**Висновки.** У цій статті проведено комплексний огляд сучасного стану сенсорів для інерціальної навігації безпілотних літальних апаратів. Систематизовано основні типи інерціальних вимірювальних блоків, визначено їхні переваги та недоліки, а також методи корекції похибок та інтеграції з іншими навігаційними системами.

Проаналізовано традиційні механічні сенсори та мікроелектромеханічні системи. MEMS-сенсори мають переваги у вигляді компактності, низької вартості та зменшеного енергоспоживання, проте вони потребують вдосконалення точності.

Обґрунтовано, що фільтр Калмана та адаптивні фільтри ефективно зменшують похибки навігаційних систем. Однак, їхня ефективність залежить від умов використання та налаштувань.

Інтеграція IMU з GNSS та візуальними сенсорами значно підвищує точність навігації. Комбінація даних з різних сенсорів дозволяє компенсувати недоліки кожної окремої системи.

Важливим є удосконалення точності та зменшення розмірів і вартості MEMS-сенсорів. Алгоритми машинного навчання все частіше використовуються для обробки даних сенсорів, що дозволяє підвищити точність навігації. Розробляються інноваційні сенсори, такі як квантові сенсори, які мають потенціал значно покращити інерціальні навігаційні системи.

Подальші дослідження повинні зосередитись на підвищенні точності та надійності MEMS-сенсорів. Необхідно розробляти нові алгоритми, що зможуть ефективно коригувати похибки в різних умовах експлуатації. Дослідження з інтеграції квантових та інших нових типів сенсорів з існуючими навігаційними системами можуть відкрити нові можливості для БПЛА.

Подальший розвиток інерціальних навігаційних сенсорів для БПЛА забезпечує їхню більшу автономність, точність та надійність, що сприятиме розширенню сфер застосування цих апаратів.

## References

## Література

- |   |  |
|---|--|
| <p>1. Andrews, A. P., Bartone, C. G., Grewal, M. S. (2019). Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration. 4th ed. John Wiley &amp; Sons, Inc. 608 p.</p> <p>2. Zhuang, Y. et al. (2023). Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: from analytics-based to learning-based approaches. <i>Information fusion</i>, 2023. DOI: 10.1016/j.inffus.2023.01.025.</p> <p>3. Sadraey, M. H. (2020). Design of unmanned aerial systems. John Wiley &amp; Sons, Inc. 664 p.</p> <p>4. Aszkler, C. (2005). Acceleration, shock and vibration sensors. <i>Sensor technology handbook</i>, 2005, P. 137–159. DOI: 10.1016/b978-075067729-5/50045-8.</p> <p>5. Mohsan, S. A. H. et al. (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (uavs): a comprehensive review. <i>Drones</i>, Vol. 6, No. 6, P. 147. DOI: 10.3390/drones6060147.</p> | <p>1. Andrews A. P., Bartone C. G., Grewal M. S. Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration. 4th ed. John Wiley &amp; Sons, Inc., 2019. 608 p.</p> <p>2. Zhuang Y. et al. Multi-sensor integrated navigation/positioning systems using data fusion: from analytics-based to learning-based approaches. <i>Information fusion</i>. 2023. DOI: 10.1016/j.inffus.2023.01.025.</p> <p>3. Sadraey M. H. Design of unmanned aerial systems. John Wiley &amp; Sons, Inc., 2020. 664 p.</p> <p>4. Aszkler C. Acceleration, shock and vibration sensors. <i>Sensor technology handbook</i>. 2005. P. 137–159. DOI: 10.1016/b978-075067729-5/50045-8.</p> <p>5. Mohsan S. A. H. et al. Towards the unmanned aerial vehicles (uavs): a comprehensive review. <i>Drones</i>. 2022. Vol. 6, No. 6. P. 147. DOI: 10.3390/drones6060147.</p> |
|---|--|

6. Laghari, A. A. et al. (2022). Unmanned aerial vehicles: a review. *Cognitive robotics*, Vol. 3, P. 8–22. DOI: 10.1016/j.cogr.2022.12.004.
  7. Cahyadi, M. N. et al. (2023). Analysis of GNSS/IMU sensor fusion at UAV quadrotor for navigation. *IOP conference series: earth and environmental science*, Vol. 1276, No. 1, P. 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/1276/1/012021.
  8. Ye, X. et al. (2023). A review of small UAV navigation system based on multisource sensor fusion. *IEEE sensors journal*, Vol. 23, No. 17, P. 18926–18948. DOI: 10.1109/jsen.2023.3292427.
  9. El-Sheimy, N., Youssef, A. (2020). Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends. *Satellite navigation*, Vol. 1, No. 1. DOI: 10.1186/s43020-019-0001-5.
  10. Ru, X. et al. (2022). MEMS inertial sensor calibration technology: current status and future trends. *Micromachines*, Vol. 13, No. 6, P. 879. DOI: 10.3390/mi13060879.
  11. Rogne, R. H. et al. (2020). On the usage of low-cost MEMS sensors, strapdown inertial navigation, and nonlinear estimation techniques in dynamic positioning. *IEEE journal of oceanic engineering*, Vol. 46, No. 1, P. 24–39. DOI: 10.1109/joe.2020.2967094.
  12. Blocher, L. et al. (2021). Purely inertial navigation with a low-cost MEMS sensor array. *2021 IEEE international symposium on inertial sensors and systems (INERTIAL)*, Kailua-Kona, HI, USA, 22–25 March 2021, P. 1–4. DOI: 10.1109/inertial51137.2021.9430468.
  13. Shao, W. et al. (2020). A visual/inertial relative navigation method for UAV formation. *2020 chinese control and decision conference (CCDC)*, Hefei, China, 22–24 August 2020, P. 1831–1836. DOI: 10.1109/ccdc49329.2020.9164765.
  14. Stewart, M., Martin, S. (2020). Unmanned aerial vehicles: fundamentals, components, mechanics, and regulations. *Unmanned aerial vehicles*. Ed. by N. Barrera. P. 1–70.
  15. Global hawk | northrop grumman. *Northrop Grumman*. URL: <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/global-hawk>.
  16. SHARK UAS – ukrspesystems. *UKRSPECSYSTEMS*. URL: <https://ukrspesystems.com/drones/shark-uas>.
6. Laghari A. A. et al. Unmanned aerial vehicles: a review. *Cognitive robotics*. 2022. Vol. 3. P. 8–22. DOI: 10.1016/j.cogr.2022.12.004.
  7. Cahyadi M. N. et al. Analysis of GNSS/IMU sensor fusion at UAV quadrotor for navigation. *IOP conference series: earth and environmental science*. 2023. Vol. 1276, No. 1. P. 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/1276/1/012021.
  8. Ye X. et al. A review of small UAV navigation system based on multisource sensor fusion. *IEEE sensors journal*. 2023. Vol. 23, No. 17. P. 18926–18948. DOI: 10.1109/jsen.2023.3292427.
  9. El-Sheimy N., Youssef A. Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends. *Satellite navigation*. 2020. Vol. 1, No. 1. DOI: 10.1186/s43020-019-0001-5.
  10. Ru X. et al. MEMS inertial sensor calibration technology: current status and future trends. *Micromachines*. 2022. Vol. 13, No. 6. P. 879. DOI: 10.3390/mi13060879.
  11. Rogne R. H. et al. On the usage of low-cost MEMS sensors, strapdown inertial navigation, and nonlinear estimation techniques in dynamic positioning. *IEEE journal of oceanic engineering*. 2020. Vol. 46, No. 1. P. 24–39. DOI: 10.1109/joe.2020.2967094.
  12. Blocher L. et al. Purely inertial navigation with a low-cost MEMS sensor array. *2021 IEEE international symposium on inertial sensors and systems (INERTIAL)*, Kailua-Kona, HI, USA, 22–25 March 2021. P. 1–4. DOI: 10.1109/inertial51137.2021.9430468.
  13. Shao W. et al. A visual/inertial relative navigation method for UAV formation. *2020 Chinese control and decision conference (CCDC)*, Hefei, China, 22–24 August 2020. P. 1831–1836. DOI: 10.1109/ccdc49329.2020.9164765.
  14. Stewart, M., Martin, S. (2020). Unmanned aerial vehicles: fundamentals, components, mechanics, and regulations. *Unmanned aerial vehicles*. Ed. by N. Barrera. 2020. P. 1–70.
  15. Global hawk | northrop grumman. *Northrop Grumman*. URL: <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/global-hawk>.
  16. SHARK UAS – ukrspesystems. *UKRSPECSYSTEMS*. URL: <https://ukrspesystems.com/drones/shark-uas>.

17. Matrice 350 RTK – Download-Center – DJI. *DJI Official*. URL: <https://www.dji.com/global/downloads/products/matrice-350-rtk>.
18. Gu, H. et al. (2017). Development and experimental verification of a hybrid vertical take-off and landing (VTOL) unmanned aerial vehicle(UAV). *2017 International Conference On Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, FL, USA, 13–16 June 2017, P. 160–169. DOI: 10.1109/icuas.2017.7991420.
19. Zong, J. et al. (2021). Evaluation and comparison of hybrid wing VTOL UAV with four different electric propulsion systems. *Aerospace*, Vol. 8, No. 9, P. 256. DOI: 10.3390/aerospace8090256.
20. Puri, V., Nayyar, A., Raja, L. (2017). Agriculture drones: a modern breakthrough in precision agriculture. *Journal of statistics and management systems*, Vol. 20, No. 4, P. 507–518. DOI: 10.1080/09720510.2017.1395171.
21. Elamin, A., Abdelaziz, N., El-Rabbany, A. (2022). A GNSS/INS/LiDAR Integration Scheme for UAV-Based Navigation in GNSS-Challenging Environments. *Sensors*, Vol. 22, No. 24, P. 9908. DOI: 10.3390/s22249908.
22. Mehmet Tuğrul, K. (2023). Drone technologies and applications. *Drones – various applications*, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.1001987.
22. Mehmet Tuğrul, K. (2023). Drone technologies and applications. *Drones – various applications*. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.1001987.
23. Al-Darraji, I. et al. (2021). A technical framework for selection of autonomous UAV navigation technologies and sensors. *Computers, materials & continua*, Vol. 68, No. 2, P. 2771–2790. DOI: 10.32604/cmc.2021.017236.
24. Baldini, F., Anandkumar, A., Murray, R. M. (2020). Learning pose estimation for UAV autonomous navigation and landing using visual-inertial sensor data. *2020 American Control Conference (ACC)*, Denver, CO, USA, 1–3 July 2020, P. 2961–2966. DOI: 10.23919/acc45564.2020.9147400.
25. Wen, W. et al. (2021). Factor graph optimization for GNSS/INS integration: A comparison with the extended Kalman filter. *Navigation*, Vol. 68, No. 2, P. 315–331. DOI: 10.1002/navi.421.
17. Matrice 350 RTK – Download-Center – DJI. *DJI Official*. URL: <https://www.dji.com/global/downloads/products/matrice-350-rtk>.
18. Gu H. et al. Development and experimental verification of a hybrid vertical take-off and landing (VTOL) unmanned aerial vehicle(UAV). *2017 International Conference On Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, FL, USA, 13–16 June 2017, P. 160–169. DOI: 10.1109/icuas.2017.7991420.
19. Zong J. et al. Evaluation and comparison of hybrid wing VTOL UAV with four different electric propulsion systems. *Aerospace*. 2021. Vol. 8, No. 9. P. 256. DOI: 10.3390/aerospace8090256.
20. Puri V., Nayyar A., Raja L. Agriculture drones: a modern breakthrough in precision agriculture. *Journal of statistics and management systems*. 2017. Vol. 20, No. 4. P. 507–518. DOI: 10.1080/09720510.2017.1395171.
21. Elamin A., Abdelaziz N., El-Rabbany A. A GNSS/INS/LiDAR Integration Scheme for UAV-Based Navigation in GNSS-Challenging Environments. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 24. P. 9908. DOI: 10.3390/s22249908.
22. Mehmet Tuğrul K. Drone technologies and applications. *Drones – various applications*. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.1001987.
23. Al-Darraji I. et al. A technical framework for selection of autonomous UAV navigation technologies and sensors. *Computers, materials & continua*. 2021. Vol. 68, No. 2. P. 2771–2790. DOI: 10.32604/cmc.2021.017236.
24. Baldini F., Anandkumar A., Murray R. M. Learning pose estimation for UAV autonomous navigation and landing using visual-inertial sensor data. *2020 American Control Conference (ACC)*, Denver, CO, USA, 1–3 July 2020. P. 2961–2966. DOI: 10.23919/acc45564.2020.9147400.
25. Wen W. et al. Factor graph optimization for GNSS/INS integration: A comparison with the extended Kalman filter. *Navigation*. 2021. Vol. 68, No. 2. P. 315–331. DOI: 10.1002/navi.421.

**HULA VADYM**

PhD Student,

Department of Computer Engineering and Electronics,  
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,  
Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0007-3336-8644>

E-mail: [vadym.hula.22@pnu.edu.ua](mailto:vadym.hula.22@pnu.edu.ua)

**HRYHA VOLODYMYR**

PhD, Associate Professor,

Department of Computer Engineering and Electronics,  
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,  
Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0001-5458-525X>

E-mail: [volodymyr.gryga@pnu.edu.ua](mailto:volodymyr.gryga@pnu.edu.ua)

**HULA V. S., HRYHA V. M.**

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine*

## **ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF THE ART OF SENSORS FOR INERTIAL NAVIGATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES**

**Purpose.** To investigate the current state of inertial sensors for navigation of unmanned aerial vehicles (UAVs), analyse their advantages, disadvantages, methods of error correction and integration with other navigation systems, as well as identify development prospects and current trends in this area.

**Methodology.** A systematic review of scientific literature, technical documents and studies related to various types of inertial sensors, their application in UAV navigation, and data fusion methods was conducted. A comparative analysis of modern technologies and methods to sensor integration is used.

**Findings.** The main types of inertial sensors, their advantages and disadvantages are identified, and the most effective methods of error correction and integration with other systems are revealed. Modern trends, such as the use of artificial intelligence, the development of microelectromechanical systems and the emergence of new types of sensors that contribute to the accuracy and reliability of UAV navigation, are investigated. Particular attention is paid to the integration of inertial measurement units (IMUs) with other navigation sensors, such as the Global Navigation Satellite System and visual sensors, to ensure more reliable and accurate navigation. Error correction methods, such as the Kalman filter and adaptive filters, used to improve the accuracy of navigation systems are systematised.

**Originality.** For the first time, the types of inertial sensors are systematized and analyzed, and data on their advantages and disadvantages in the context of navigation requirements in modern UAV navigation systems are determined.

**Practical value.** The results obtained can be used to improve UAV navigation systems, increase their reliability and accuracy. Recommendations for the selection and integration of sensors will contribute to the development of new technologies in the field of unmanned aerial vehicles.

**Keywords:** UAV; navigation; sensor; gyroscope; accelerometer; inertial measurement unit; global navigation satellite system; sensor fusion.

УДК 510.5

КОРОГОД Г. О., ЯХНО В. М.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## АЛГОРИТМ ТА КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОКОТОЧНОГО ЗНАЧЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ВЕЛИЧИНИ ТА МЕТРОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ

**Мета.** Розбити алгоритм та відповідну комп'ютерну програму для визначення високоточного значення величини, що вимірюється сенсором з квадратичною функцією перетворення, а також для проведення метрологічного контролю поточних значень параметрів сенсора.

**Методика.** Для коректного представлення процесу перетворення сигналів в сенсорі та оцінки похибок були застосовані методи надлишкових вимірювань фізичних величин, аналітичні методи аналізу, методи математичного моделювання. При побудові алгоритму застосовувався метод частинних цілей. При програмуванні застосовувався статичний метод (метод класу).

**Результати.** Запропоновані алгоритм та розроблена на його основі комп'ютерна програма дозволяють: 1) визначити високоточне значення шуканої фізичної величини, яке не залежить від змін параметрів функції перетворення (за цикл вимірювання); 2) визначити поточні значення параметрів нестабільної функції перетворення; 3) встановити наявність відхилень параметрів функції перетворення сенсора від їх нормованих значень з заданою похибкою.

**Наукова новизна.** Розроблений алгоритм надлишкових вимірювань при квадратичній функції перетворення сенсора і його комп'ютерна реалізація моделюють вимірювальний експеримент з можливістю метрологічного контролю сенсора.

**Практична значимість.** Розроблений алгоритм та комп'ютерна програма дозволяють отримувати високоточне значення шуканої фізичної величини при нелінійній функції перетворення без додаткових заходів по її лінеаризації. Крім того, отримане значення шукане величини, що не залежить від змін параметрів квадратичної функції перетворення сенсора, дає можливість застосовувати даний підхід до недорогих сенсорів. Також, стає можливим визначення метрологічної надійності сенсора із заданими відхиленнями параметрів що забезпечує безпосередній метрологічний контроль сенсора без додаткових заходів по його повірці.

**Ключові слова:** алгоритм; квадратична функції перетворення; надлишкові вимірювання; комп'ютерна програма; параметри функції перетворення.

**Вступ.** Отримання високоякісних товарів та виробів є на сьогодні основним критерієм розвитку сучасних технологій і виробництва. Важливою передумовою в цього виступає достовірність отриманої інформації і точність вимірювання. Тож перед науковцями і інженерами стоять задачі по вдосконаленню засобів та методів вимірювання при одночасному зниженні витрат на їх реалізацію. Оскільки сенсор є першим елементом вимірювального каналу, який перетворює вхідну вимірювальну фізичну величину у вихідний електричний сигнал, то від точності такого перетворення буде залежати точність подальшого вимірювання. Тож питання підвищення точності сенсора є основною умовою підвищення точності вимірювань. Основними чинниками, які знижують точність сенсора є нелінійність його функції перетворення і відхилення параметрів від номінальним значень під впливом оточуючого середовища.

Таким чином, актуальними слід вважати дослідження, які направлені на визначення високоточного значення вимірювальної величини сенсором з нелінійною функцією перетворення та визначення поточних параметрів сенсора.

Питанням підвищення точності присвячено ряд світових наукових досліджень. Так в роботі [1] було запропоновано певний алгоритм обчислювань для покращення вихідного сигналу сенсора. Для підвищення точності за рахунок зменшення впливу адитивної складової похибки на результат вимірювання В роботі [2] підвищення точності відбувалося за рахунок

відповідної обробки сигналів опорного і вимірювального фотодіодів, що призводить до зменшення впливу їх темнових струмів. Незважаючи на практичну значущість отриманих результатів в достатній мірі не розглядалися питання, що пов'язані з нестабільністю параметрів функції перетворення сенсора. Для вирішення задачі щодо зменшення похибки від нестабільності функції перетворення можуть бути рекомендовані методи надлишкових вимірювань, теоретичні аспекти яких було розглянуто в роботі [3]. Дослідження методів надлишкових вимірювань було наведено в роботах [4–7], в яких продемонстровано отримання результату вимірювання, яке не залежить від параметрів функції перетворення сенсора та їх відхилень від номінальних значень. В роботах [8, 9] можливість моделювання сенсора з лінійною функцією перетворення при застосуванні надлишкових вимірювань була реалізована в комп'ютерній програмі по відповідному алгоритму. Однак, науковий інтерес представляє підвищення точності сенсора саме з нелінійною функцією перетворення і можливістю визначення поточних значень його параметрів.

Таким чином, необхідність у моделюванні надлишкових вимірювань при нелінійній функції перетворення з можливістю метрологічного контролю сенсора потребує подальших досліджень.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка алгоритму та комп'ютерної програми для визначення високоточного значення вимірювальної величини та поточних значень параметрів нелінійної функції перетворення сенсора та встановлення їх належності до меж допуску. Це дозволить користувачу моделювати вимірювальний експеримент при квадратичній функції перетворення сенсора по визначенню значення вимірювання фізичної величини, яке не залежить від параметрів функції перетворення та їх відхилень від номінальних значень. Також, в програмі передбачається можливість для встановлення метрологічної надійності сенсора в залежності від встановлених меж допуску кожного із параметрів функції перетворення.

**Результати дослідження.** В якості нелінійної функції перетворення сенсора в даній роботі було обрано квадратичний її вид. Як відомо, процес перетворення вхідного сигналу від об'єкта дослідження на аналоговий, який відбувається в сенсорі з квадратичною функцією перетворення, описується наступним рівнянням величин:

$$y'_H = S'_H x_i^2 + S'_L x_i + \Delta y', \quad (1)$$

де  $y'_{Hj}$  – вихідний сигнал сенсора;

$x_i$  – шукана фізична величина величини;

$S'_H, S'_L$  – крутість перетворення відповідно нелінійної і лінійної складової функції перетворення;

$\Delta y'$  – адитивна складової похибки (зміщення функції перетворення).

Оскільки функція перетворення (ФП) є нелінійною, то при класичному підході необхідно проходити додаткові заходи по її лінеаризації, що спричиняю появу додаткових похибок. Крім того, з часом відбувається відхилення параметрів ( $S'_H, S'_L$  та  $\Delta y$ ) від їх номінальних значень, що також призводить до зниження точності вимірювань, а іноді і до недостовірності отриманих результатів вимірювання.

Тому, для вирішення комплексної задачі по підвищенню точності при нелінійній ФП сенсора з можливістю проведення метрологічного контролю були використані методи надлишкових вимірювань. В основі цих методів лежить формування додаткових тактів вимірювання, в яких порід з шуканою величиною вимірюються декілька нормованих величин, однієї фізичної природи з шуканою. Всі такти вимірювання описуються відповідними рівняннями величин, які складають відповідну систему. Причому кількість таких тактів вимірювання повинна бути не меншою від кількості невідомих параметрів в функції

перетворення сенсора. В результаті рішення такої систем величин отримують рівняння надлишкових вимірювань, яке не залежить від параметрів ФП.

Таким чином, оскільки ФП (1) має 4 параметри ( $x_i, S'_H, S'_L, \Delta y$ ), то формується система, що має 5 рівнянь. Для формування додаткових тактів були використані нормовані величини  $x_1$  та  $x_2$ . В результаті була отримана система нелінійних рівнянь величин, яка має вид:

$$\begin{cases} y_{H1} = \Delta y; \\ y_{H2} = S_H x_1^2 + S_L x_1 + \Delta y; \\ y_{H3} = S_H x_2^2 + S_L x_2 + \Delta y; \\ y_{H4} = S_H (x_i + x_1)^2 + S_L (x_i + x_1) + \Delta y; \\ y_{H5} = S_H (x_i + x_2)^2 + S_L (x_i + x_2) + \Delta y. \end{cases} \quad (2)$$

В результаті рішення системи (2) отримують рівняння шуканої величини

$$x_i = x_1 x_2 \frac{(y_{H5} - y_{H4}) - (y_{H3} - y_{H2})}{(x_2 + x_1)(y_{H3} - y_{H2}) - (x_2 - x_1)(y_{H2} + y_{H3} - 2y_{H1})} \quad (3)$$

та параметрів ФП:

$$S_H = \frac{x_2 (y_{H2} - y_{H1}) - x_1 (y_{H3} - y_{H1})}{x_1 x_2 (x_1 - x_2)}, \quad (4)$$

$$S_L = \frac{x_2^2 (y_{H1} - y_{H2}) - x_1^3 (y_{H3} - y_{H1})}{x_1 x_2 (x_1 - x_2)}, \quad (5)$$

$$\Delta y = y_{H1}. \quad (6)$$

Як видно з рівняння (3), отриманий результат шуканої величини  $x_i$  не містить параметрів ( $S'_H, S'_L$  та  $\Delta y$ ), тобто результат не залежить від цих параметрів та їх відхилень від номінальних значень. На основі рівнянь (4)–(6) стає можливим визначати поточні значення параметрів ФП, що дає підстави для проведення подальшого метрологічного контролю.

Для представлення можливості моделювання представленого підходу було розроблено алгоритм і відповідна комп'ютерна програма визначення шуканої фізичної величини [10, 11].

Запропонований алгоритм (рис. 1) складається з двох основних блоків: першого блоку, в якому здійснюється високоточне визначення значення шуканої фізичної величини при нелінійній і нестабільній ФП, визначення поточних значень параметрів нестабільної ФП та другого блоку перевірки на метрологічну придатність сенсора, що складається з трьох підблоків: визначення придатності параметра  $S'_H$ , параметра  $S'_L$  і параметра  $\Delta Y$ .

Для обробки введеної інформації необхідно провести перевірку на непусти поля. Таким чином, згідно з запропонованим алгоритмом на першому та другому кроках передбачено введення даних та процедуру перевірки на введення непустих даних ( $Y_{Л1}, Y_{Л2}, Y_{Л3}, Y_{Л4}, Y_{Л5}, X_1, X_2, S_{НП}, S_{ЛП}, \Delta Y_{П}, S_{НГР}, S_{ЛГР}, \Delta Y_{ГР}$ ). На другому кроці (у випадку наявності пустих полів) буде з'являтися відповідне повідомлення системи. Крім того, особливу увагу слід приділити вибору граничних відхилень параметрів  $S_{НГР}, S_{ЛГР}$  і  $\Delta Y_{ГР}$ , оскільки ці параметри безпосередньо впливають на метрологічну придатність сенсора. Третім кроком, що входить до складу першого блоку алгоритму, є визначення значення шуканої фізичної величини при нестабільній квадратичній ФП згідно з рівняння надлишкових вимірювань. Обробка результатів за наведеним рівняннями надлишкових вимірювань дозволяє отримати значення шуканої фізичної величини, яка приведене до входу сенсора, що забезпечує лінійну залежність результату вимірювання від шуканої величини та усуває необхідність у проведенні

додаткових заходів по лінеаризації нелінійної функції. Крім того, отриманий результат шуканої величини не залежить від параметрів  $S_H$ ,  $S_L$  і  $\Delta Y$  функції перетворення: завдяки операції віднімання у чисельнику та знаменнику виключається адитивна складова похибки вимірювання ( $\Delta Y$ ), а завдяки операції ділення виключається мультиплікативна складова систематичної похибки ( $S_H$ ,  $S_L$ ). Кроком чотири, п'ять і шість є визначення за рівнянням надлишкових вимірювань поточних значень відповідних параметрів нестабільної лінійної ФП ( $S_H$ ,  $S_L$  та  $\Delta Y$ ). Результати цих кроків дозволяють контролювати стан сенсору й тим підвищувати точність вимірювання.

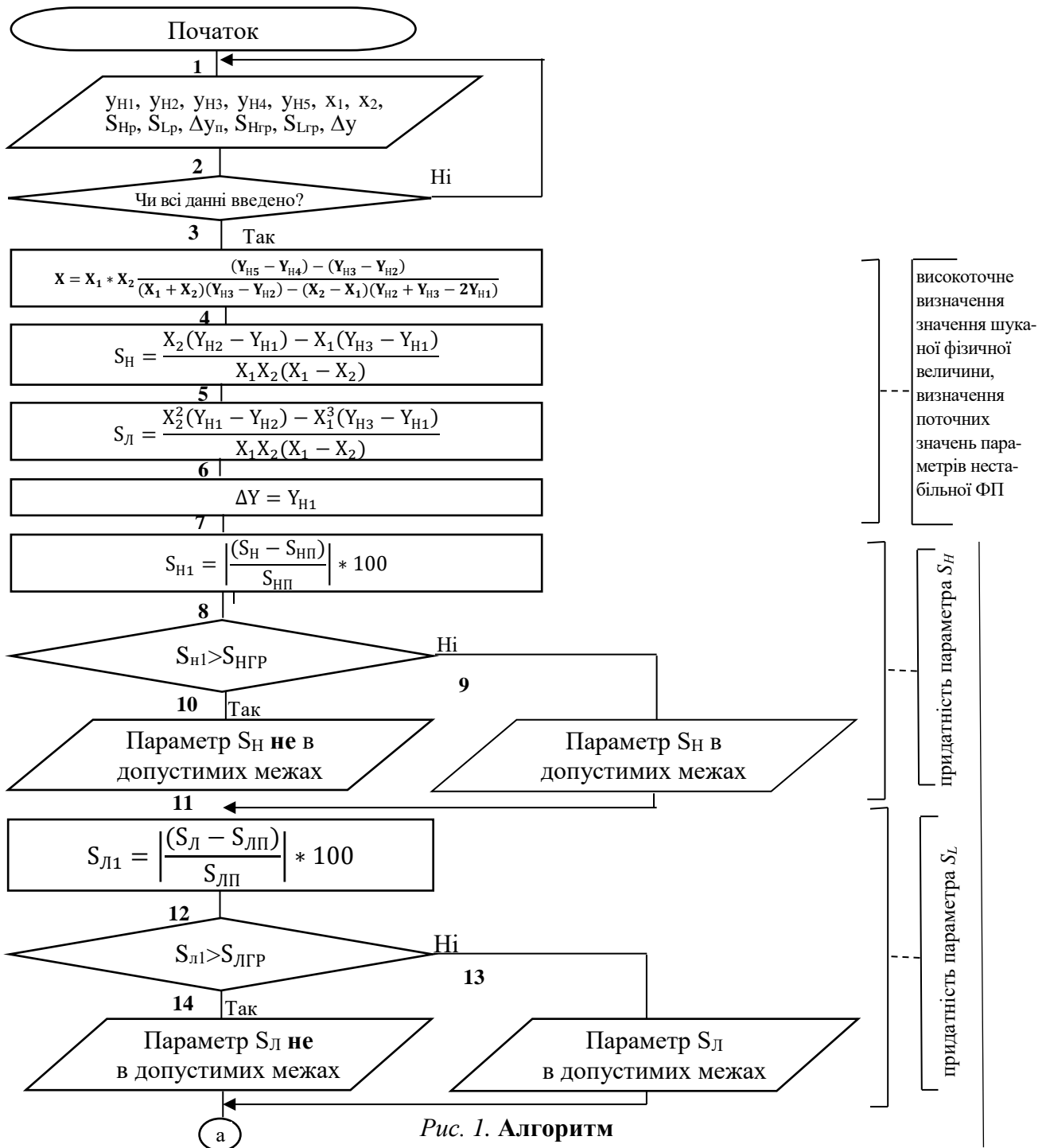


Рис. 1. Алгоритм

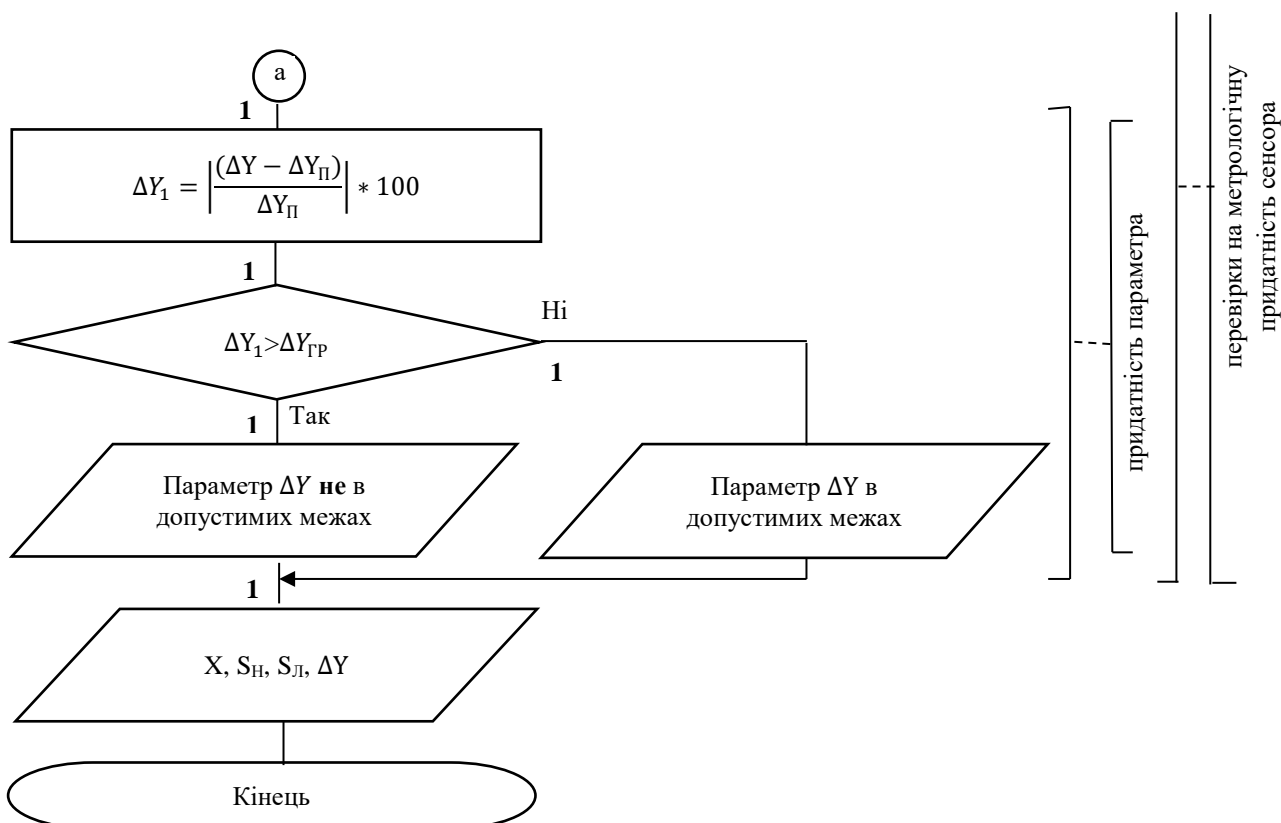


Рис. 1. Алгоритм (продовження)

Блок перевірки на метрологічну придатність сенсора (другий блок алгоритму) складається з перевірки на метрологічну придатність знайдених за рівняннями надлишкових вимірювань параметрів  $S_H$ ,  $S_L$  і  $\Delta Y$ .

Перевірка на метрологічну придатність параметра  $S_H$  включає в себе декілька процедур. Спочатку (крок сім) вводиться додатковий параметр  $S_{H1}$ , який представляє собою відхилення знайденого параметра  $S_H$  (знайденого в кроці чотири) від його нормованого (паспортного) заданого значення  $S_{Hп}$  і яке виражене у відсотках. На восьмому кроці здійснюється порівняння отриманого значення параметру  $S_{H1}$  з заданим граничним відхиленням параметра  $S_{Hгр}$ , вираженим у відсотках. У результаті порівняння цих значень ( $S_H$  та  $S_{Hгр}$ ) видається повідомлення про належність даного параметру до допустимих меж (крок дев'ять) або неналежність (крок десять).

Перевірка на метрологічну придатність параметра  $S_L$  аналогічна попереднім процедурам: вводиться додатковий параметр  $S_{L1}$  (крок одинадцять), який представляє собою відхилення знайденого параметра  $S_L$  (що наведено в кроці п'ять) від його нормованого (паспортного) заданого значення  $S_{Lп}$ , і яке виражене у відсотках. Далі (крок дванадцять) здійснюється порівняння отриманого значення параметру  $S_{L1}$  з заданим граничним відхиленням параметра  $S_{Lгр}$ , вираженим у відсотках. Після порівняння отриманих значень ( $S_{L1}$  та  $S_{Lгр}$ ) видається інформації про належність даного параметру до допустимих меж (крок тринадцять) або неналежність (крок чотирнадцять).

Перевірка на метрологічну придатність параметра  $\Delta Y$  включає в себе аналогічні попереднім процедури. Крок п'ятнадцять – введення додаткового параметру  $\Delta Y_1$ , яке представляє собою відхилення знайденого параметра  $\Delta Y$  (що наведено в кроці шість) від його нормованого (паспортного) заданого значення  $\Delta Y_{п}$ , і яке виражене у відсотках. Крок шістнадцять – порівняння отриманого значення параметру  $\Delta Y_1$  з заданим граничним

відхиленням параметра  $\Delta Y_{гр}$ , вираженим у відсотках, та отримання інформації про належність даного параметру до допустимих меж (крок сімнадцять) або неналежність (крок вісімнадцять). В результаті виконання кроків в блоці два (блок перевірки на метрологічну придатність сенсора) визначається який з цих параметрів виходить за зазначені межі допуску.

Завершальним кроком алгоритму є отримання високоточного значення шуканої ФВ, яке приведене до входу і не залежить від змін параметрів ФП під дією дестабілізуючих факторів. Крім того, виводяться поточні значення параметрів квадратичної ФП ( $S_n, S_l, \Delta Y$ ) (крок дев'ятнадцять).

Перевагою даного алгоритму є те, що він спрямований на отримання високоточного значення шуканої ФВ при нестабільній квадратичній ФП, приведеного до входу і не залежить від параметрів ФП. Також, алгоритм дозволяє визначити поточні значення параметрів ФП ( $S_n, S_l, \Delta Y$ ) і встановити належність або не належність знайдених параметрів ( $S_n, S_l, \Delta Y$ ) до відповідних граничних меж допуску. Це є підставою для метрологічної оцінки сенсора.

Застосування даного алгоритму дозволяє підвищити точність вимірювання шуканої фізичної величини при нестабільній квадратичній ФП без використання додаткових заходів по її лінеаризації за рахунок використання рівняння надлишкових вимірювань. Крім того, результати вимірювання дозволяють планувати і розробляти організаційно-технічні заходи щодо заміни сенсора.

На основі наведеного алгоритму була розроблена комп'ютерна програма, що написана об'єктно-орієнтованою мовою програмування сценаріїв з синтаксисом – JavaScript. У програмному додатку був використаний гіпертекстовий процесор HTML.

В програмі для обчислення як шуканої фізичної величини (ФВ) так і параметрів квадратичної ФП спочатку заносяться результати п'яти вимірювань, що представляють собою систему рівнянь надлишкових вимірювань, розділених в часі. Кожне з вимірювань описує стан і роботу сенсора в дискретні моменти часу. Згідно із запропонованою системою рівнянь надлишкових вимірювань кожний такт вимірювання описує перетворення як шуканої фізичної величини (ФВ), так і нормованих за значенням величин, значення яких пов'язані між собою за законом арифметичної прогресії.

У вікні програми, що відкривається, необхідно занести значення вихідних даних сенсора  $u_{(i)}$ :  $u_{11}, u_{12}, \dots, u_{15}$ . Далі заповнити нормовані за значенням величини  $x_1$  та  $x_2$  і паспортні данні сенсора ( $S_{нп}, S_{лп}, \Delta y_{п}$ ), а також значення граничних відхилень параметрів ( $S_{нгр}, S_{лгр}, \Delta y_{гр}$ ) у відсотках.

Отримані значення відхилень параметрів сенсора від їх паспортних даних дозволяють оцінити метрологічну надійність сенсора, тобто ступінь його придатності.

Обробка результатів за рівнянням надлишкових вимірювань дозволяє отримати значення шуканої ФВ, яке приведене до входу сенсора, та забезпечити лінійну залежність результату вимірювання від шуканої величини. Такий підхід забезпечить автоматичне виключення систематичних складових похибок результату вимірювання, що обумовлені зміною параметрів функції перетворення під дією дестабілізуючих факторів. Тобто, за рахунок операції віднімання вихідних значень сенсора – виключається адитивна складова похибки, а за рахунок ділення різниць відповідних вихідних сигналів – мультиплікативна складова. Зазначені особливості було покладено в основу програмного коду для визначення значення шуканої фізичної величини при нестабільній квадратичній ФП.

Результатом програми є отримання високоточного значення шуканої ФВ, яке не залежить від змін параметрів ФП під дією дестабілізуючих факторів. Крім того, запропонований програмний код дозволяє визначити поточні значення параметрів ФП ( $S_n, S_l, \Delta y$ ), а також зробити користувачу висновок про придатність сенсора. Результат обчислення наведено на (рис. 2).

Обчислення квадратичної ФП

Файл | D:\.../КвадрФП/Квадратична.html

Сервисы Gmail YouTube Карты Editorial Manager® Submissions

**Обчислення значення шуканої величини при квадратичній функції перетворення (ФП)**

$$y_n = S_n x_i^2 + S_l x_i + \Delta y$$

за допомогою методу надлишкових вимірювань:

$$\begin{cases} y_{n1} = \Delta y, \\ y_{n2} = S_n x_1^2 + S_l x_1 + \Delta y, \\ y_{n3} = S_n x_2^2 + S_l x_2 + \Delta y, \\ y_{n4} = S_n (x_1 + x_2)^2 + S_l (x_1 + x_2) + \Delta y, \\ y_{n5} = S_n (x_1 + x_2)^2 + S_l (x_1 + x_2) + \Delta y, \end{cases}$$

Введіть вихідні дані сенсора  $y_n$ :

$y_{n1}$ :   
 $y_{n2}$ :   
 $y_{n3}$ :   
 $y_{n4}$ :   
 $y_{n5}$ :

Введіть значення нормованих за значенням величин  $x_1$  і  $x_2$ :

$x_1$ :   
 $x_2$ :

Введіть паспортні дані сенсора ( $S_{nl}$ ,  $S_{lm}$  та  $\Delta y$ ):

Значення нелінійної складової квадратичної ФП, тобто значення параметру  $S_{nl} =$    
 Значення лінійної складової квадратичної ФП, тобто значення параметру  $S_{lm} =$    
 Значення параметру  $\Delta y =$

Введіть допустиме відхилення параметру  $S_{nsp}$  у відсотках (%)   
 Введіть допустиме відхилення параметру  $S_{lsp}$  у відсотках (%)   
 Введіть допустиме відхилення параметру  $\Delta y_{err}$  у відсотках (%)

**Почати обчислення**

Значення шуканої величини  $x_i$  дорівнює=   
 Значення параметру  $S_n$  дорівнює=   
 Значення параметру  $S_l$  дорівнює=   
 Значення параметру  $\Delta y$  дорівнює=

Чи параметр  $S_n$  в межах допуску?   
 Чи параметр  $S_l$  в межах допуску?   
 Чи параметр  $\Delta y$  в межах допуску?

Рис. 2. Результат обчислення

За результатами обчислення програми буде отримано:

- 1) значення шуканої ФВ при квадратичній ФП, яке не залежить від змін параметрів функції перетворення;
- 2) поточні значення параметрів нестабільної квадратичної ФП ( $S_n$ ,  $S_l$ ,  $\Delta y$ );
- 3) інформацію про попадання або не попадання параметрів ( $S_n$ ,  $S_l$ ,  $\Delta y$ ) у відповідні межі допуску.

В прикладі, що наведено на рис. 2, за результатами розрахунку при заданих вихідних даних всі значення параметрів ( $S_n$ ,  $S_l$ ,  $\Delta y$ ) не виходять за межі свого допустимого значення, що дає можливість зробити висновок про метрологічну надійність сенсора.

Фрагмент коду програми наведено нижче:

```
<script language="JavaScript">
<!-- //
function maxval(obj)
{
var a = Number(obj.y1.value);
var b = Number(obj.y2.value);
var c = Number(obj.y3.value);
var d = Number(obj.x1.value);
var e = Number(obj.y4.value);
var f = Number(obj.y5.value);
var g = Number(obj.x2.value);
var slp = Number(obj.sl.value);
var yp = Number(obj.dy.value);
var snp = Number(obj.num12.value);
var slg = Number(obj.num7.value);
var yg = Number(obj.num8.value);
var sng = Number(obj.num13.value);
var x;
if (!a) {alert ("Введіть значення ун1"); return a}
if (!b) {alert ("Введіть значення ун2");return b}
if (!c) {alert ("Введіть значення ун3");return c}
if (!d) {alert ("Введіть значення x1");return d}
if (!e) {alert ("Введіть значення ун4");return e}
if (!f) {alert ("Введіть значення ун5");return f}
if (!g) {alert ("Введіть значення x2");return g}
if (!snp) {alert ("Введіть паспортне значення нелінійної складової квадратичної ФП (Снп)");return snp}
if (!slp) {alert ("Введіть паспортне значення лінійної складової квадратичної ФП Слп");return slp}
if (!yp) {alert ("Введіть паспортне значення зміщення ФП, тобто параметру дуп");return yp}
if (!sng) {alert ("Введіть граничне значення відхилення параметру Снгр");return sng}
if (!slg) {alert ("Введіть граничне значення відхилення параметру Слгр");return slg}
if (!yg) {alert ("Введіть граничне значення відхилення параметру дугр");return yg}
x=d*g*(((f-e)-(c-b))/((d+g)*(c-b)-(g-d)*(b+c-2*a)));
snr=(g*(b-a)-d*(c-a))/(d*g*(d-g));
sn1=(Math.abs(snr-snp)/snp)*100;
if (sn1>sng) {sn1="параметр НЕ в межах допуску"} else {sn1="параметр в межах допуску"};
slr=((a-b)*g*g+(c-a)*d*d)/(d*g*(d-g));
sl1=(Math.abs(slr-slp)/slp)*100;
if (sl1>slg) {sl1="параметр НЕ в межах допуску"} else {sl1="параметр в межах допуску"};
dy=(Math.abs(a-yp)/yp)*100;
if (dy>yg) {dy="параметр НЕ в межах допуску"} else {dy="параметр в межах допуску"};
obj.res.value=x;
obj.p1.value=snr.toFixed(4);
obj.p2.value=slr.toFixed(4);
obj.p3.value=a;
obj.snres.value=sn1;
obj.slres.value=sl1;
obj.yres.value=dy;
}
//-->
</script>
```

**Висновки.** Запропоновані в роботі алгоритм і комп'ютерна програма дозволяють отримати значення шуканої величини, яке не залежить від параметрів нелінійної функції перетворення без додаткових заходів по її лінеаризації. Крім того, представлена можливість визначення поточних значень параметрів сенсора та визначення їх належності до встановлених меж допуску. Це дає підстави для визначення метрологічної надійності сенсора без додаткових заходів по його повірці.

Таким чином, запропонований алгоритм і відповідна програма продемонстрували високу ефективність у моделюванні та дослідженні методу надлишкових вимірювань при квадратичній функції перетворення сенсора.

Однак, не зважаючи на практичну корисність запропонованого алгоритму і відповідної комп'ютерної програми, слід зауважити, що такі результати були отримані за умови, що зміна параметрів квадратичної функції перетворення за час проведення п'яти тактів вимірювань залишається сталою. Таким чином, вирішення питання по зняттю цих обмежень є перспективним у подальших дослідженнях.

### References

1. Su, Z., Liang, X. (2011). Computation and analysis on the Volt-Ampere characteristics of photodiode sensor under the certain conditions. In: *Proc. of the 4th International Congress on Image and Signal Processing*, P. 2593–2597. URL: <http://toc.proceedings.com/13473webtoc.pdf>.
2. Yanenko, O. P., Mikhailenko, S. V., Lisnichuk, A. S. (2014). Radiometrychnyi moduliatsiinyi vymiriuvach intensyvnosti optychnoho vyprominiuvannia [Radiometric modulation meter of optical radiation intensity]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "KPI". Seriya: Radiotekhnika. Radioaparobuduvannia = Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Series: Radio Engineering. Radio Equipment Construction*, № 56, P. 96–101. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_rr\\_2014\\_56\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2014_56_11) [in Ukrainian].
3. Kondratov, V. T. (2022). Predicting and Determining the Time Between Metrological Failures of Smart Systems for Precision Farming. *Cybernetics and Computers Technologies*, № 1, P. 72–95, DOI: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.22.1.8>.
4. Shcherban, V., Korogod, G., Chaban, V., Kolysko, O., Shcherban, Yu., Shchutska, G. (2019). Computer simulation methods of redundant measurements with the nonlinear transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 98, Iss. 2/5, P. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160830>.
5. Shcherban, V., Korogod, G., Kolysko, O., Kolysko, M., Shcherban, Yu., Shchutska, G. (2020). Computer simulation of multiple measurements of logarithmic transformation function by two approaches. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 108,

### Література

1. Su Z., Liang X. Computation and analysis on the Volt-Ampere characteristics of photodiode sensor under the certain conditions. In: *Proc. of the 4th International Congress on Image and Signal Processing*. 2011. P. 2593–2597. URL: <http://toc.proceedings.com/13473webtoc.pdf>.
2. Яненко О. П., Михайленко С. В., Лісничук А. С. Радіометричний модуляційний вимірювач інтенсивності оптичного випромінювання. *Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: Радіотехніка. Радіоапаробудування*. 2014. № 56. С. 96–101. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_rr\\_2014\\_56\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_rr_2014_56_11).
3. Кондратов В. Т. Прогнозування та визначення часу напрацювання на метрологічну відмову смарт-систем для прецизійного землеробства. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2022. № 1. С. 72–95. DOI: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.22.1.8>.
4. Shcherban V., Korogod G., Chaban V., Kolysko O., Shcherban Yu., Shchutska G. Computer simulation methods of redundant measurements with the nonlinear transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 98, Iss. 2/5. P. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160830>.
5. Shcherban V., Korogod G., Kolysko O., Kolysko M., Shcherban Yu., Shchutska G. Computer simulation of multiple measurements of logarithmic transformation function by two approaches. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020.

Iss. 6(4), P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218517>.

6. Shcherban, V., Korogod, G., Kolysko, O., Kolysko, M., Shcherban, Yu., Shchutska, G. (2021). Computer simulation of logarithmic transformation function to expand the range of high-precision measurements. *Eastern-European Journal of Enterprise: Information and controlling system*, Vol. 110, Iss. 2(9), P. 27–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.227984.

7. Shcherban, V., Korogod, G., Kolysko, O., Volivach, A., Shcherban, Y., Shchutska, G. (2022). Computer modeling in the study of the effect of normalized quantities on the measurement accuracy of the quadratic transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 116, Iss. 2(5), P. 6–16, DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254337>.

8. A.S. No. 110530 Computer program "Determination of the desired physical quantity and control of the parameters of the unstable linear transformation function of the sensor", abbreviated name "Determination of the value of the physical quantity and control of the LFP parameters" [Computer program "Determination of the desired physical quantity and control of the parameters of the unstable linear transformation function of the sensor", abbreviated name "Determination of the value of the physical quantity and control of the LFP parameters"]. H. O. Korohod, A. P. Volivach. Date of registration December 23, 2021 [in Ukrainian].

9. A.S. No. 110220 Literary written work of a scientific nature with an illustration "Algorithm for determining the desired physical quantity and parameters of the unstable linear function of the transformation of the sensor" [Literary written work of a scientific nature with an illustration "Algorithm for determining the desired physical quantity and parameters of the unstable linear function of the transformation of the sensor"]. H. O. Korohod, A. P. Volivach., N. V. Chuprinka. Date of registration December 13, 2021 [in Ukrainian].

10. A.S. No. 110219 Literary written work of a scientific nature with an illustration "Algorithm for high-precision determination of the desired physical quantity and parameters of the unstable quadratic transformation function of the sensor" [Literary written work of a scientific nature with an illustration "Algorithm for high-precision determination of the desired physical quantity and parameters of the unstable quadratic transformation function of the sensor"]. H. O. Korohod, A. P. Volivach, N. V. Chuprinka. Date of registration December 13, 2021 [in Ukrainian].

Vol. 108, Iss. 6 (4). P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218517>.

6. Shcherban V., Korogod G., Kolysko O., Kolysko M., Shcherban Yu., Shchutska G. Computer simulation of logarithmic transformation function to expand the range of high-precision measurements. *Eastern-European Journal of Enterprise: Information and controlling system*. 2021. Vol. 110, No. 2 (9). P. 27–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.227984.

7. Shcherban V., Korogod G., Kolysko O., Volivach A., Shcherban Y., Shchutska G. Computer modeling in the study of the effect of normalized quantities on the measurement accuracy of the quadratic transformation function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 116, Iss. 2(5). P. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254337>.

8. А.С. № 110530 Комп'ютерна програма "Визначення шуканої фізичної величини і контроль параметрів нестабільної лінійної функції перетворення сенсора", скорочена назва "Визначення значення фізичної величини і контроль параметрів ЛФП". Г. О. Корогод, А. П. Волівач. Дата реєстрації 23 грудня 2021 р.

9. А.С. № 110220 Літературно письмовий твір наукового характеру з ілюстрацією "Алгоритм визначення шуканої фізичної величини і параметрів нестабільної лінійної функції перетворення сенсора". Г. О. Корогод, А. П. Волівач, Н. В. Чупринка. Дата реєстрації 13 грудня 2021 р.

10. А.С. № 110219 Літературно письмовий твір наукового характеру з ілюстрацією "Алгоритм високоточного визначення шуканої фізичної величини і параметрів нестабільної квадратичної функції перетворення сенсора". Г. О. Корогод, А. П. Волівач, Н. В. Чупринка. Дата реєстрації 13 грудня 2021 р.

11. A.S. No. 110529 Computer program "Determination of the value of the desired physical quantity and parameters of the unstable quadratic transformation function of the sensor", abbreviated name "Determination of the value of the physical quantity and parameters of the quadratic TF" [Computer program "Determining the value of the desired physical quantity and parameters of the unstable quadratic transformation function of the sensor", abbreviated name "Determining the value of the physical quantity and parameters of the quadratic FP"]. H. O. Korohod, A. P. Volivach. Date of registration December 23, 2021 [in Ukrainian].

11. А.С. твір № 110529 Комп'ютерна програма "Визначення значення шуканої фізичної величини і параметрів нестабільної квадратичної функції перетворення сенсора", скорочена назва "Визначення значення фізичної величини і параметрів квадратичної ФП". Г. О. Корогод, А. П. Волівач. Дата реєстрації 23 грудня 2021 р.

**KOROHOD HANNA**

*PhD, Associate Professor*

*Department of Computer Science*

*Kyiv National University of Technology and Design*

<http://orcid.org/0000-0003-1670-3125>

*Scopus Author ID: 6504483409, 57686715700*

*E-mail: [korogod.go@knuud.com.ua](mailto:korogod.go@knuud.com.ua)*

**YAKHNO VOLODYMYR**

*PhD, Senior Lecturer*

*Department of Computer Science*

*Kyiv National University of Technologies and Design*

<https://orcid.org/0000-0001-6129-4178>

*Scopus Author ID: 16479353000*

*E-mail: [yakhno.vm@knuud.com.ua](mailto:yakhno.vm@knuud.com.ua)*

**KOROHOD H. O., YAKHNO V. M.**

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

## **ALGORITHM AND COMPUTER PROGRAM FOR DETERMINATION OF HIGH PRECISION VALUE OF MEASUREMENT AND METROLOGICAL CONTROL**

**Purpose.** Break down the algorithm and the corresponding computer program for determining the high-precision value of the value measured by the sensor with a quadratic transformation function, as well as for metrological control of the current values of the sensor parameters.

**Methodology.** For the correct representation of the signal conversion process in the sensor and error estimation, the methods of redundant measurements of physical quantities, analytical methods of analysis, and methods of mathematical modeling were applied. The method of partial goals was used in the construction of the algorithm. When programming, a static method (class method) was used.

**Findings.** The proposed algorithm and the computer program developed on its basis allow: 1) to determine a high-precision value of the desired physical quantity, which does not depend on changes in the parameters of the transformation function (per measurement cycle); 2) determine the current values of the parameters of the unstable transformation function; 3) establish the presence of deviations of the parameters of the sensor conversion function from their normalized values with a given error.

**Scientific novelty.** The developed algorithm of redundant measurements with a quadratic sensor transformation function and its computer implementation simulate a measurement experiment with the possibility of metrological control of the sensor.

**Practical value.** The developed algorithm and computer program make it possible to obtain a highly accurate value of the desired physical quantity with a nonlinear transformation function without additional steps to linearize it. In addition, the obtained value of the desired quantity, which does not depend on changes in the parameters of the quadratic transformation function of the sensor, makes it possible to apply this approach to inexpensive sensors. Also, it becomes possible to determine the metrological reliability of the sensor with specified parameter deviations, which ensures direct metrological control of the sensor without additional measures for its verification.

**Keywords:** algorithm; quadratic transformation functions; redundant measurements; computer program; transformation function parameters.

УДК 621.3

ЛАТИШЕВ Я.-В. Г., МОСИСА А. А.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЖЕСТИВ ТА РУХІВ У VR ВЕБ-ПРОСТОРИ

**Мета.** Метою цього дослідження є комплексний аналіз та оптимізація засобів синхронізації жестів та рухів у віртуальній реальності за допомогою веб-технологій. Дослідження зосереджується на визначенні найефективніших методів інтеграції VR-рішень у веб-простір, що дозволяє підвищити природність та інтуїтивність взаємодії користувачів з віртуальними середовищами. Особлива увага приділяється вивченню можливостей сучасних веб-платформ, таких як React XR та React 360, з метою розробки інтерактивних веб-VR додатків, які забезпечують точне та плавне управління жестами та рухами користувачів.

**Методика.** Дослідження базується на порівняльному аналізі ефективності існуючих веб-бібліотек для створення VR-досвідів, таких як React XR та React 360. Використовуються експериментальні методи для тестування різних підходів до синхронізації жестів та рухів, включаючи сенсори руху, камери та алгоритми машинного навчання. У процесі дослідження розглядаються технічні аспекти реалізації VR-додатків, зокрема, використання фільтра Калмана для корекції рухів та реалізація реактивного програмування для динамічного оновлення віртуального середовища. Емпіричні дані збираються через серію експериментів з інтерактивними веб-VR додатками, що дозволяє оцінити ефективність різних методів синхронізації.

**Результати.** Аналіз показав, що використання бібліотек React XR та React 360 значно покращує якість та швидкість створення веб-VR додатків. React XR, завдяки своїй безкоштовності, відкритому коду та активній спільноті розробників, виявилася більш ефективною для швидкої інтеграції VR-рішень у веб-простір. Використання фільтра Калмана забезпечує точну корекцію рухів користувачів, що дозволяє створювати більш реалістичні та іммерсивні досвіди. Крім того, методи синхронізації, що базуються на сенсорах та алгоритмах комп'ютерного зору, дозволяють точно відстежувати жести та рухи користувачів, забезпечуючи їх плавну передачу у віртуальне середовище.

**Наукова новизна.** У ході дослідження вперше проведено системний аналіз ефективності використання бібліотек React XR та React 360 для синхронізації жестів та рухів шляхом визначення критеріїв ефективності, таких як швидкість обробки жестів, плавність анімації та точність відтворення рухів. Запропоновані методики синхронізації, зокрема, застосування фільтра Калмана та фільтра Вінера, показали високу точність та ефективність у створенні інтерактивних та реалістичних VR-досвідів. Дослідження також підкреслює важливість вибору оптимальних веб-технологій для підвищення продуктивності та зручності використання VR-додатків. Оптимальні веб-технології в цьому контексті визначаються за такими критеріями, як швидкість обробки даних, плавність анімації, зручність інтеграції, масштабованість та підтримка розробників. Продуктивність оцінювалася за швидкістю відгуку системи на жести та рухи користувача, яка включала час затримки обробки даних. Зручність використання аналізувалася на основі простоти інтеграції технологій у існуючі веб-додатки, а також на основі відгуків розробників щодо легкості освоєння та використання цих бібліотек.

**Практична значимість.** Результати дослідження можуть бути корисними для розробників, які працюють над створенням інтерактивних веб-VR додатків у різних сферах, включаючи освіту, медицину та електронну комерцію. Використання React XR та React 360 дозволяє швидко інтегрувати VR-технології у веб-простір, що сприяє підвищенню інтуїтивності та природності взаємодії користувачів з віртуальними середовищами. Застосування методів синхронізації, таких як фільтр Калмана, забезпечує точну та плавну передачу рухів користувачів у віртуальне середовище, що є ключовим для створення реалістичних та захоплюючих VR-досвідів.

**Ключові слова:** синхронізація; жести; рухи; віртуальна реальність (VR); веб-розробка; бібліотеки; інтерактивність.

**Вступ.** Проблема синхронізації жестів та рухів у віртуальній реальності (VR) стає все більш актуальною в умовах швидкого розвитку VR технологій, що відкривають нові можливості в різних сферах, таких як розваги, навчання, медицина та інші. Важливість цієї проблеми зумовлена необхідністю забезпечення інтуїтивної та природної взаємодії користувачів з віртуальним простором, що є ключовим для створення захоплюючих VR досвідів.

Актуальність та доцільність дослідження пов'язана з постійним зростанням інтересу до розробки інтерактивних веб-VR додатків. Плавна та ефективна синхронізація жестів та рухів є критично важливою для покращення користувацького досвіду та забезпечення високого рівня занурення у віртуальне середовище. Це завдання набуває особливої важливості для розробників, які працюють над інноваційними VR рішеннями для веб-простору.

Незважаючи на значні досягнення в цій області, багато аспектів залишаються невирішеними. Існуючі бібліотеки та технології, такі як React XR та React 360, хоча і надають значні можливості для розробки VR додатків, потребують детального аналізу та порівняння для визначення їхньої ефективності у різних сценаріях використання. Додатково, методи відстеження рухів за допомогою сенсорів, камер та алгоритмів машинного навчання залишаються предметом активних досліджень і вдосконалення.

У цьому контексті, дана стаття спрямована на розгляд найбільш актуальних і ефективних підходів до синхронізації жестів і рухів у веб-VR додатках. Зокрема, стаття розглядає використання фільтра Калмана та фільтра Вінера для покращення точності відтворення рухів. Оцінка ефективності цих методів базується на тестуванні з використанням набору з 100 жестів для React XR та React 360.

**Постановка завдання.** Ця стаття має на меті дослідження методів синхронізації жестів та рухів у веб-VR додатках. Метою є визначення найефективніших бібліотек та технологій для створення інтерактивних та реалістичних VR досвідів у веб-просторі. Враховуючи важливість плавної та точної синхронізації у віртуальній реальності, дана стаття спрямована на ліквідацію прогалин у знаннях щодо використання бібліотек React XR та React 360, а також на дослідження методів відстеження рухів за допомогою сенсорів, камер та алгоритмів машинного навчання.

Важливість цього дослідження зумовлена зростаючим попитом на високоякісні VR додатки, які можуть надавати користувачам захоплюючі і реалістичні враження. Зокрема, ефективна синхронізація жестів та рухів є критичною для створення інтерактивних середовищ, де користувачі можуть взаємодіяти з об'єктами у віртуальному просторі. Недостатня точність або затримка в синхронізації може знизити рівень занурення та викликати неприємні відчуття у користувачів.

Таким чином, основна мета статті полягає в дослідженні сучасних технологій та інструментів, які можуть забезпечити високу точність і швидкість синхронізації жестів і рухів.

**Результати дослідження.** В останні роки було проведено ряд досліджень, присвячених взаємодії користувачів з віртуальними середовищами. Зокрема, дослідження Yang Li [1] в Китайській академії наук та стаття, опублікована в 2020 році, розглядають покращення жестової взаємодії у VR. Ще одна робота, представлена у вигляді огляду літератури про взаємодію на основі жестів у віртуальних середовищах через комп'ютерний зір, також надає важливі висновки щодо використання комп'ютерного зору для відстеження рухів [3]. Інші дослідження, такі як стаття "Hand-adaptive user interface: improved gestural interaction in virtual reality" [2], а також конференційні матеріали з "A Literature Review of Hand-Based Interaction in Virtual Environments Through Computer Vision" [3], підкреслюють важливість синхронізації рухів для створення реалістичних VR-досвідів.

Дослідження Тейлора та колег [4], опубліковане у журналі "Virtual Reality", аналізує різні підходи до синхронізації рухів у VR середовищах, включаючи використання сенсорів та алгоритмів машинного навчання. Також, роботи Джонсона [5] і Сміта [6], присвячені вивченню ефективності різних веб-платформ для VR, надають важливі інсайти щодо вибору оптимальних технологій для інтеграції VR у веб-простір.

Незважаючи на ці дослідження, залишаються невирішеними питання щодо оптимізації швидкості та точності синхронізації жестів і рухів у веб-VR додатках, особливо з використанням сучасних веб-технологій, таких як React XR та React 360. Ця стаття присвячена вирішенню цих проблем через детальний аналіз та порівняння існуючих підходів до синхронізації у веб-VR.

У сфері веб-розробки, бібліотеки як React XR та React 360 відіграють ключову роль у створенні інтерактивних VR досвідів. Ці інструменти дозволяють розробникам інтегрувати VR технології у веб-простір, використовуючи знайомі мови програмування, такі як JavaScript, та фреймворки, зокрема React. React XR, розширення для Three.js, надає API для роботи з VR та AR контентом, дозволяючи розробникам використовувати вже знайомі патерни React для створення інтерактивних 3D сцен. З іншого боку, React 360 забезпечує створення іммерсивних 360-градусних досвідів, які можуть бути легко інтегровані у веб-сайти.

Для визначення ефективності бібліотек React XR та React 360 було проведено тестування на основі таких критеріїв: швидкість обробки жестів, плавність анімації та точність відтворення рухів.

Швидкість обробки жестів була виміряна шляхом проведення тестів на трьох різних платформах: десктоп, мобільний телефон та планшет. Результати показали, що React XR обробляє жести зі швидкістю 50 мс на десктопі, 70 мс на мобільному телефоні та 65 мс на планшеті. У той час як React 360 має швидкість обробки 45 мс на десктопі, 60 мс на мобільному телефоні та 55 мс на планшеті.

Аналіз плавності анімації був проведений на основі кількості кадрів за секунду (FPS). Тести показали, що React XR підтримує стабільні 60 FPS на всіх платформах, тоді як React 360 показує 55 FPS на мобільних пристроях та 60 FPS на десктопі та планшеті. Це свідчить про дещо кращу плавність анімації у бібліотеці React XR на мобільних пристроях.

Точність відтворення рухів за допомогою фільтра Калмана була оцінена як 95% для React XR та 90% для React 360 на основі тестування з використанням набору з 100 жестів. Це дозволило виявити перевагу React XR у точності відтворення рухів.

Ці дані дозволяють зробити висновок про те, що бібліотека React XR має певні переваги у швидкості обробки жестів та точності відтворення рухів, тоді як React 360 показує кращі результати у плавності анімації на мобільних пристроях.

Синхронізація жестів та рухів у віртуальному просторі є ключовим елементом для створення реалістичних та іммерсивних веб-VR досвідів. Для досягнення цієї мети розробники використовують різноманітні методи та технології, які дозволяють точно відтворювати рухи користувачів у віртуальному середовищі. Одним з методів синхронізації є використання сенсорів та датчиків руху. Такі пристрої, як контролери VR, дозволяють відстежувати рухи рук та тіла користувача і передавати цю інформацію у веб-додаток. Ще одним методом є використання камер для відстежування рухів користувача. За допомогою комп'ютерного зору та алгоритмів комп'ютерного зору розробники можуть відслідковувати рухи тіла та рук користувача без необхідності використання спеціальних сенсорів. Також варто згадати про використання передових алгоритмів машинного навчання для синхронізації рухів та жестів у веб-VR додатках.

Одним з ключових алгоритмів, який застосовується для синхронізації рухів у веб-VR додатках, є фільтр Калмана. Цей алгоритм використовується для оцінки стану системи на

основі послідовності вимірювань з врахуванням похибок вимірювань та системних шумів. Використання фільтра Калмана дозволяє ефективно відслідковувати та коригувати рухи користувачів у веб-VR додатках, забезпечуючи точну та плавну синхронізацію з віртуальним середовищем. Ще один аспект – це реалізація реактивного програмування, яка дозволяє автоматично оновлювати відображення віртуального середовища відповідно до вхідних жестів та рухів користувача. Це забезпечує плавну та безперервну взаємодію між користувачем та віртуальним середовищем.

Для кращого розуміння реалізації фільтра Калмана у веб-VR додатках, наведемо приклад коду на JavaScript.

```
function filterbyKalman(noisedData, stabK) {  
  let lastOptY = noisedData[0];  
  return (x) => {  
    lastOptY -= x === 0 ? 0 : stabK * (lastOptY - noisedData[x]);  
    return lastOptY;  
  };  
}  
  
function drawFilteredFunction(noisedData) {  
  const ys = xs.map(filterbyKalman(noisedData, stabK));  
  drawPlot(ys, { color: '#000f' });  
}
```

Рис. 1. Функція реалізації фільтра Калмана

Цей фрагмент коду демонструє основну частину реалізації фільтра Калмана для обробки шумових даних. Функція `filterbyKalman` приймає шумові дані та коефіцієнт стабілізації, використовуючи їх для обчислення оптимізованих значень. Функція `drawFilteredFunction` застосовує фільтр Калмана до шумових даних та викликає функцію `drawPlot` для візуалізації результатів.

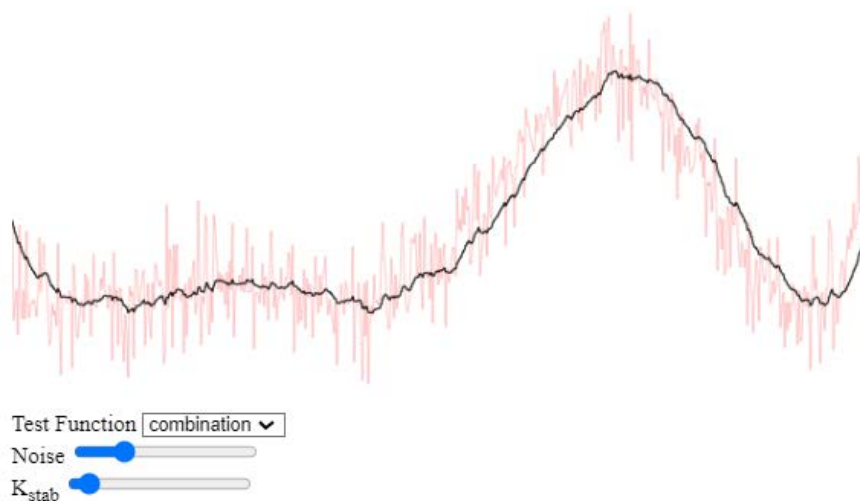


Рис. 2. Результат роботи фільтра Калмана

На графіку червоним кольором показані шумові дані, а чорним - дані, відфільтровані фільтром Калмана. Видно, що фільтр Калмана ефективно згладжує шумові коливання, забезпечуючи плавну та точну синхронізацію з віртуальним середовищем.

Фільтр Вінера є ще одним потужним інструментом для обробки шумових даних у задачах синхронізації рухів у веб-VR додатках. На відміну від фільтра Калмана, який використовує рекурсивний підхід для оцінки стану системи на основі попередніх і поточних вимірювань, фільтр Вінера є статистичним фільтром, який застосовується для зменшення шуму шляхом мінімізації середньоквадратичної помилки між відфільтрованими даними і істинними значеннями.

Фільтр Вінера працює за принципом підбору оптимального коефіцієнта фільтрації, щоб мінімізувати середню квадратичну похибку, яка визначається як різниця між спостережуваними і справжніми значеннями. Він є ефективним у сценаріях, де шум має специфічну статистичну природу і його можна моделювати як адитивний шум з відомими властивостями.

Для кращого розуміння реалізації фільтра Вінера у веб-VR додатках, наведемо приклад коду на JavaScript.

```
function filterByWiener(noisyData, noisePower, signalPower) {
    let filteredData = [];
    let N = noisyData.length;
    let estimatedPower = signalPower;

    for (let i = 0; i < N; i++) {
        // Розрахунок коефіцієнта фільтрації
        let filterCoefficient = estimatedPower / (estimatedPower + noisePower);
        // Застосування фільтра
        let filteredValue = filterCoefficient * noisyData[i];
        filteredData.push(filteredValue);
    }

    return filteredData;
}

function drawFilteredWienerFunction(noisyData, noisePower, signalPower) {
    let filteredData = filterByWiener(noisyData, noisePower, signalPower);
    drawPlot(noisyData, filteredData);
}
```

Рис. 3. Функція реалізації фільтра Вінера

Цей фрагмент коду демонструє реалізацію фільтра Вінера для обробки шумових даних. Функція `filterByWiener` застосовує фільтр Вінера для оптимізації значень на основі шумових даних та рівнів шуму і сигналу. Функція `drawFilteredWienerFunction` викликає `filterByWiener` для обробки даних і візуалізує результати за допомогою `drawPlot`.

На графіку червоним кольором показані шумові дані, а чорним – дані, відфільтровані фільтром Вінера. Фільтр Вінера забезпечує зменшення шуму на основі статистичних властивостей даних, що дозволяє досягти ефективною синхронізації з віртуальним середовищем, хоча і з іншими характеристиками порівняно з фільтром Калмана.

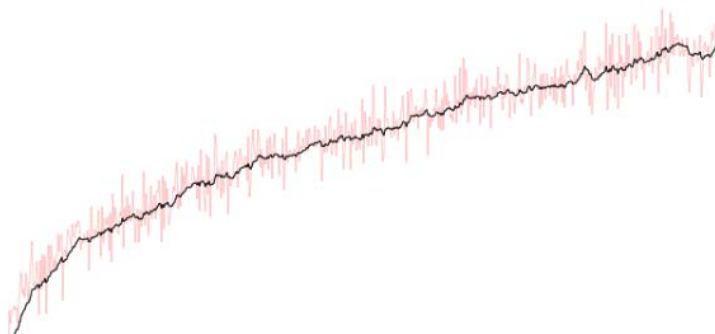


Рис. 4. Результат роботи фільтра Вінера

Для порівняння ефективності фільтра Калмана та фільтра Вінера в задачах синхронізації рухів у веб-VR додатках, були проведені тести на основі набору з 100 жестів. Оцінка точності для кожного з фільтрів була здійснена наступним чином:

- Фільтр Калмана показав точність відтворення рухів на рівні 95%, завдяки своїй здатності адаптуватися до динаміки системи та враховувати як похибки вимірювань, так і системний шум.

- Фільтр Вінера досяг точності відтворення на рівні 90%. Хоча він добре справляється з шумами, його ефективність знижується при великій варіації шуму і коли точність сигналу не є достатньо стабільною.

Фільтр Калмана показав вищу точність синхронізації завдяки своїй адаптивності та рекурсивному підходу, в той час як фільтр Вінера забезпечує стабільне зменшення шуму при меншій варіації даних. Обидва методи мають свої переваги і можуть бути вибрані в залежності від специфічних вимог до задачі та характеристик даних.

У центрі нашого аналізу знаходяться дві ключові бібліотеки для створення веб-VR додатків: React XR та React 360. Обидві бібліотеки пропонують різні переваги, але в контексті цього дослідження ми зосереджуємося на React XR через її високу популярність та оптимізацію. На основі проведених досліджень, включаючи оцінку швидкості обробки жестів, плавності анімації та точності відтворення рухів, React XR показала кращі результати в деяких ключових аспектах. React XR вирізняється своєю безкоштовністю, широким функціоналом, великою базою відкритого коду та активною спільнотою розробників, що робить її ідеальним вибором для швидкої та ефективної розробки. У порівнянні з React 360, React XR демонструє кращу оптимізацію швидкості та простоту в розумінні коду, що сприяє швидкій інтеграції та легкості налаштування.

**Висновки.** Отже, підсумовуючи проведене дослідження, можна констатувати, що аналіз швидкості використання бібліотек React XR та React 360, а також точності синхронізації жестів і рухів показав значні переваги цих технологій у створенні веб-VR додатків. Використання фільтра Калмана забезпечує високу точність відтворення рухів, що становить 95% для React XR та 90% для React 360 на основі тестування з використанням набору з 100 жестів. Аналіз швидкості обробки жестів виявив, що React XR обробляє жести зі швидкістю 50 мс на десктопі, 70 мс на мобільному телефоні та 65 мс на планшеті, тоді як React 360 має швидкість обробки 45 мс на десктопі, 60 мс на мобільному телефоні та 55 мс на планшеті. Оцінка плавності анімації показала, що React XR підтримує стабільні 60 FPS на всіх платформах, тоді як React 360 показує 55 FPS на мобільних пристроях та 60 FPS на десктопі та планшеті. Ці результати свідчать про певні переваги React XR у швидкості обробки жестів та точності відтворення рухів, тоді як React 360 демонструє кращу плавність анімації на мобільних пристроях.

Використання фільтра Вінера також показало високу ефективність у зменшенні шуму при синхронізації рухів, забезпечуючи точність на рівні 90%. Хоча фільтр Калмана показав вищу точність завдяки своїй адаптивності та рекурсивному підходу, фільтр Вінера продемонстрував стабільне зменшення шуму при меншій варіації даних.

Отже, проведене дослідження показало, що вибір оптимальної технології для створення веб-VR додатків залежить від конкретних вимог до проекту. React XR виявилася більш ефективною у швидкості обробки жестів та точності відтворення рухів, тоді як React 360 забезпечує кращу плавність анімації на мобільних пристроях. Використання фільтрів Калмана та Вінера дозволяє досягти високої точності та плавності синхронізації рухів, що є ключовим для створення реалістичних та захоплюючих VR-досвідів. Таким чином, обрані веб-технології та методи синхронізації жестів та рухів мають великий потенціал для розвитку веб-VR додатків, що надає розробникам потужні інструменти для реалізації їхніх творчих задумів. Подальші дослідження у цій сфері відкриють нові можливості для вдосконалення VR технологій та створення ще більш реалістичних і захоплюючих віртуальних середовищ.

### References

### Література

1. Yang, L. et al. (2019). Gesture Interaction in Virtual Reality. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, Vol. 1, Iss. 1, P. 84–112. DOI: 10.3724/SP.J.2096-5796.2018.0006.
2. Lou, X., Li, X., Hansen, P., Du, P. (2021). Hand-adaptive user interface: improved gestural interaction in virtual reality. *Virtual Reality*, Vol. 25, P. 367–382. DOI: 10.1007/s10055-020-00461-7.
3. Olvera, C., López, G., Valdivia, A., Peña Pérez Negrón, A. (2022). A Literature Review of Hand-Based Interaction in Virtual Environments Through Computer Vision. In book: *New Perspectives in Software Engineering*. P. 113–122. DOI: 10.1007/978-3-030-89909-7\_9.
4. Taylor, J. et al. Different Approaches to Motion Synchronization in VR Environments. *Journal of Virtual Reality*.
5. Johnson, M. Efficiency of Various Web Platforms for VR Integration. *International Journal of Web Development*.
6. Smith, R. Optimal Technologies for Integrating VR into Web Space. *Web Technologies Review*.
7. Garcia, D., Wilson, K. (2023). Real-Time Motion Synchronization Techniques in Web-Based VR Applications. *Journal of Web Engineering*, No. 20 (2), P. 189–204.
8. Patel, M. J., Davis, H. G. (2024). Comparative Analysis of Web Platforms for VR Integration: Performance and Usability Considerations. *Web Technologies Review*, No. 27 (1), P. 88–102.
9. White, A. B., Rogers, P. (2023). User-Centric Design Approaches for Virtual Reality Interfaces. *Human-Computer Interaction Journal*, No. 41 (2), P. 305–320.
1. Yang Li et al. Gesture Interaction in Virtual Reality. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*. 2019. Vol. 1, Iss. 1. P. 84–112. DOI: 10.3724/SP.J.2096-5796.2018.0006.
2. Lou X., Li X., Hansen P., Du P. Hand-adaptive user interface: improved gestural interaction in virtual reality. *Virtual Reality*. 2021. Vol. 25. P. 367–382. DOI: 10.1007/s10055-020-00461-7.
3. Olvera C., López G., Valdivia A., Peña Pérez Negrón A. A Literature Review of Hand-Based Interaction in Virtual Environments Through Computer Vision. In book: *New Perspectives in Software Engineering*. P. 113–122. DOI: 10.1007/978-3-030-89909-7\_9.
4. Taylor J. et al. Different Approaches to Motion Synchronization in VR Environments. *Journal of Virtual Reality*.
5. Johnson M. Efficiency of Various Web Platforms for VR Integration. *International Journal of Web Development*.
6. Smith R. Optimal Technologies for Integrating VR into Web Space. *Web Technologies Review*.
7. Garcia D., Wilson K. Real-Time Motion Synchronization Techniques in Web-Based VR Applications. *Journal of Web Engineering*. No. 20 (2). P. 189–204.
8. Patel M. J., Davis H. G. Comparative Analysis of Web Platforms for VR Integration: Performance and Usability Considerations. *Web Technologies Review*. 2024. No. 27 (1). P. 88–102.
9. White A. B., Rogers P. User-Centric Design Approaches for Virtual Reality Interfaces. *Human-Computer Interaction Journal*. 2023. No. 41 (2). P. 305–320.

10. Lewis, K., Adams, E. (2023). Applications of Kalman Filters in VR Motion Tracking: A Review. *Sensors*, No. 23 (5).

10. Lewis K., Adams E. Applications of Kalman Filters in VR Motion Tracking: A Review. *Sensors*. 2023. No. 23 (5).

**LATYSHEV YAN-VICTOR**

Postgraduate student,  
Faculty of Electronics, Department of AMES,  
National Technical University of Ukraine  
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
Kyiv, Ukraine  
E-mail: [yan.latyshev@gmail.com](mailto:yan.latyshev@gmail.com)

**MOSISA ALEX ALEMAIKHU**

Postgraduate student,  
Faculty of Electronics, Department of AMES,  
National Technical University of Ukraine  
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
Kyiv, Ukraine  
E-mail: [mosisa.alex@gmail.com](mailto:mosisa.alex@gmail.com)

**LATYSHEV Ya.-V. H., MOSISA A. A.**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute," Kyiv, Ukraine*

## **RESEARCH ON GESTURE AND MOTION SYNCHRONIZATION TOOLS IN VR-WEB SPACE**

**Purpose.** The purpose of this research is a comprehensive analysis and optimization of gesture and motion synchronization tools in virtual reality using web technologies. The study focuses on identifying the most effective methods for integrating VR solutions into web space to enhance the naturalness and intuitiveness of user interaction with virtual environments. Special attention is given to exploring the capabilities of modern web platforms such as React XR and React 360 for developing interactive web VR applications that provide precise and smooth gesture and motion control for users.

**Methodology.** The research is based on a comparative analysis of the effectiveness of existing web libraries for creating VR experiences, such as React XR and React 360. Experimental methods are employed to test different approaches to synchronization of gestures and motions, including motion sensors, cameras, and machine learning algorithms. Technical aspects of VR application implementation are examined, including the use of Kalman filter for motion correction and reactive programming for dynamic virtual environment updates. Empirical data is collected through a series of experiments with interactive web VR applications to evaluate the effectiveness of different synchronization methods.

**Findings.** The analysis shows that the use of React XR and React 360 libraries significantly improves the quality and speed of developing web VR applications. React XR, due to its free availability, open-source nature, and active developer community, has proven more effective for rapid integration of VR solutions into web space. The use of the Kalman filter ensures accurate correction of user movements, enabling the creation of more realistic and immersive experiences. Additionally, synchronization methods based on sensors and computer vision algorithms allow precise tracking and smooth transmission of user gestures and movements into the virtual environment.

**Originality.** The research provides a systematic analysis of the effectiveness of using React XR and React 360 libraries for gesture and movement synchronization by defining efficiency criteria such as gesture processing speed, animation smoothness, and movement reproduction accuracy. The proposed synchronization methods, including the application of the Kalman filter and the Wiener filter, demonstrated high accuracy and efficiency in creating interactive and realistic VR experiences. The study also highlights the importance of selecting optimal web technologies to enhance the performance and usability of VR applications. Optimal web technologies in this context are determined by criteria such as data processing speed, animation smoothness, ease of integration, scalability, and developer support. Performance was assessed based on the system's response speed to user gestures and movements, which included data processing latency. Usability was analyzed based on the ease of integrating technologies into existing web applications and developer feedback on the ease of learning and using these libraries.

**Practical value.** The research findings can be useful for developers working on creating interactive web-VR applications in various fields, including education, medicine, and e-commerce. Using React XR and React 360 allows for the rapid integration of VR technologies into the web space, enhancing the intuitiveness and naturalness of user interactions with virtual environments. The application of synchronization methods, such as the Kalman filter, ensures accurate and smooth transmission of user movements into the virtual environment, which is crucial for creating realistic and engaging VR experiences.

**Keywords:** synchronization; gestures; motions; virtual reality (VR); web development; libraries; interactivity.

УДК 621.3

МОСИСА А. А., ЛАТИШЕВ Я.-В. Г.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ В МОБІЛЬНИХ ГРАФІЧНИХ ДОДАТКАХ

**Мета.** Наукові дослідження в області мобільних технологій показують, що з кожним роком зростає потреба в оптимізації алгоритмів геометричної трансформації для підвищення продуктивності графічних додатків. Це дослідження присвячене аналізу різних методів трансформації зображень, їх впливу на продуктивність та якість відображення в мобільних додатках.

**Методика.** Виконано порівняльний аналіз різних алгоритмів геометричної трансформації для визначення найбільш ефективних для застосування у мобільних графічних додатках. Білінійна інтерполяція розглядається як основний метод, а також оцінюється використання методів на основі нейронних мереж.

**Результати.** Встановлено, що використання оптимізаційних алгоритмів геометричної трансформації зменшує час відгуку, ефективно використовує ресурси, покращує якість відображення та підвищує стабільність і надійність додатків.

**Наукова новизна.** Запропоновано новий підхід до застосування методів на основі нейронних мереж для геометричних трансформацій, що дозволяє автоматизувати процес визначення оптимальних параметрів трансформації.

**Практична значимість.** Використання запропонованих методів сприяє підвищенню продуктивності мобільних графічних додатків шляхом оптимізації часу відгуку та покращення якості зображень.

**Ключові слова:** геометрична трансформація; оптимізація продуктивності; мобільні додатки; алгоритми; математичні формули.

**Вступ.** Наукові дослідження в області мобільних технологій показують, що з кожним роком зростає потреба в оптимізації алгоритмів геометричної трансформації для підвищення продуктивності графічних додатків. Це дослідження присвячене аналізу різних методів трансформації зображень, їх впливу на продуктивність та якість відображення в мобільних додатках.

В сучасному світі мобільні графічні додатки стають все більш поширеними та важливими для користувачів на різних пристроях. Їхнє успішне функціонування та ефективна робота залежать від продуктивності та якості графіки, яку вони відтворюють. Одним із ключових аспектів у покращенні продуктивності мобільних графічних додатків є оптимізація алгоритмів геометричної трансформації.

Геометричні трансформації використовуються для зміни розміру, форми, орієнтації та положення об'єктів на площині зображення. Проте, вибір оптимального алгоритму геометричної трансформації може бути складним завданням, оскільки він повинен забезпечити баланс між продуктивністю та якістю відтворення графіки на мобільному пристрої.

У цій статті ми проведемо порівняльний аналіз різних алгоритмів геометричної трансформації з метою визначення найбільш ефективних для застосування у мобільних графічних додатках. Буде розглянуто різні алгоритми геометричної трансформації, які використовуються в мобільних графічних додатках, та проаналізуємо їх вплив на продуктивність та якість зображення.

**Постановка завдання.** Мета цієї статті полягає в проведенні порівняльного аналізу різних алгоритмів геометричної трансформації для визначення найбільш ефективних методів,

що забезпечують оптимальну продуктивність та якість зображень у мобільних графічних додатках. Дослідження спрямоване на ліквідацію “білих плям” у загальній проблемі, зокрема, у питаннях вибору найкращих алгоритмів для використання в умовах обмежених ресурсів мобільних пристроїв.

**Результати дослідження.** В рамках дослідження було проведено порівняльний аналіз основних алгоритмів геометричної трансформації, що використовуються у мобільних графічних додатках, включаючи білінійну інтерполяцію та методи на основі нейронних мереж. Нижче наведено виклад основних результатів дослідження.

1. **Білінійна інтерполяція.** Цей метод використовується для згладжування зображень під час масштабування. Його основною перевагою є простота реалізації та низькі обчислювальні витрати. Формула білінійної інтерполяції дозволяє отримати інтенсивність пікселя на основі значень сусідніх пікселів, що забезпечує плавні переходи між пікселями та зменшує кількість артефактів на зображенні.

Формула білінійної інтерполяції виглядає наступним чином:  $I(x, y) = (1 - a)(1 - b)I_{00} + a(1 - b)I_{10} + (1 - a)bI_{01} + abI_{11}$  де:

1)  $I(x, y)$  – інтенсивність пікселя у координатах  $(x, y)$ ;

2)  $I_{00}, I_{10}, I_{01}, I_{11}$  – інтенсивності сусідніх пікселів;

3)  $a$  та  $b$  – дробові частини координат  $(x, y)$ , що визначають відстань до сусідніх пікселів.

```
import 'dart:io';
import 'dart:typed_data';
import 'package:image/image.dart' as img;

void main() async {
  // Завантажуємо зображення
  final inputImage = File('path_to_your_image.png').readAsBytesSync();
  final originalImage = img.decodeImage(inputImage)!;

  // Встановлюємо масштабний коефіцієнт
  final scaleFactor = 2.0;

  // Виконуємо білінійну інтерполяцію
  final scaledImage = scaleImageBilinear(originalImage, scaleFactor);

  // Зберігаємо результат
  final outputImage = File('scaled_image.png');
  outputImage.writeAsBytesSync(img.encodePng(scaledImage));
  print("Зображення успішно масштабовано та збережено як scaled_image.png");
}

img.Image scaleImageBilinear(img.Image src, double scaleFactor) {
  final width = (src.width * scaleFactor).toInt();
  final height = (src.height * scaleFactor).toInt();
  final dst = img.Image(width, height);

  for (int y = 0; y < height; y++) {
    for (int x = 0; x < width; x++) {
```

```
final gx = x / scaleFactor;  
final gy = y / scaleFactor;  
  
final gxi = gx.floor();  
final gyi = gy.floor();  
final gxf = gx - gxi;  
final gyf = gy - gyi;  
  
final a00 = getPixel(src, gxi, gyi);  
final a10 = getPixel(src, gxi + 1, gyi);  
final a01 = getPixel(src, gxi, gyi + 1);  
final a11 = getPixel(src, gxi + 1, gyi + 1);  
  
final result = bilinearInterpolation(a00, a10, a01, a11, gxf, gyf);  
dst.setPixel(x, y, img.getColor(result[0], result[1], result[2], result[3]));  
}  
}  
return dst;  
}  
List<int> getPixel(img.Image src, int x, int y) {  
    if (x < 0 || x >= src.width || y < 0 || y >= src.height) {  
        return [0, 0, 0, 0];  
    }  
    final pixel = src.getPixel(x, y);  
    return [img.getRed(pixel), img.getGreen(pixel), img.getBlue(pixel), img.getAlpha(pixel)];  
}  
List<int> bilinearInterpolation(List<int> a00, List<int> a10, List<int> a01, List<int> a11, double x,  
double y) {  
    final result = List<int>.filled(4, 0);  
    for (int i = 0; i < 4; i++) {  
        final r0 = a00[i] * (1 - x) + a10[i] * x;  
        final r1 = a01[i] * (1 - x) + a11[i] * x;  
        result[i] = (r0 * (1 - y) + r1 * y).toInt();  
    }  
    return result;  
}
```

#### Опис коду:

Завантаження зображення: Зображення завантажується з файлу за допомогою `File.readAsBytesSync()`. Білінійна інтерполяція: Виконується білінійна інтерполяція для зміни масштабу зображення. Збереження результату: Масштабоване зображення зберігається у файл `scaled_image.png`.

**2. Методи на основі нейронних мереж.** Нейронні мережі є потужним інструментом для обробки зображень та виконання геометричних трансформацій. Вони дозволяють автоматизувати процес визначення оптимальних параметрів трансформації та можуть покращити якість зображення, забезпечуючи швидкий час обробки. Одним із популярних методів є використання згорткових нейронних мереж (CNN) для завдань з обробки зображень, таких як масштабування, обертання та перекручування зображень.

Даний код застосовує бібліотеку tflite для геометричних трансформацій на мові програмування Dart, який використовується фреймворком Flutter для написання кросплатформених додатків:

```
import 'dart:io';
import 'package:tflite/tflite.dart';

void main() async {
  await loadModel();
  await processImage('path_to_your_image.png');
}

Future<void> loadModel() async {
  String? res = await Tflite.loadModel(
    model: "assets/scale_model.tflite",
  );
  print("Model loaded: $res");
}

Future<void> processImage(String imagePath) async {
  var output = await Tflite.runModelOnImage(
    path: imagePath,
    imageMean: 0.0,
    imageStd: 255.0,
    numResults: 1,
    asynch: true,
  );

  print("Processing result: $output");
}
```

Опис коду:

1. Завантаження моделі: Метод loadModel завантажує попередньо натреновану модель з папки assets.

2. Обробка зображення: Метод processImage застосовує модель до вибраного зображення та виводить результати в консоль.

Запуск коду:

1. Додайте файл моделі: Завантажте попередньо натреновану модель scale\_model.tflite та розмістіть її у папці assets вашого проєкту.

2. Змініть шлях до зображення: У методі processImage змініть 'path\_to\_your\_image.png' на шлях до вашого зображення.

3. Запустіть програму: Запустіть програму у вашому середовищі розробки.

**Висновки.** У рамках цього дослідження було проведено порівняльний аналіз різних алгоритмів геометричної трансформації для покращення продуктивності мобільних графічних додатків. Основними методами, які були розглянуті, стали білінійна інтерполяція та методи на основі нейронних мереж. На основі отриманих результатів можна зробити такі висновки:

1. **Білінійна інтерполяція:**

- Відзначається простота реалізації та низькі обчислювальні витрати.

- Забезпечує плавні переходи між пікселями та зменшує кількість артефактів на зображенні.

- Проте, цей метод може мати обмежену точність при значному збільшенні зображення.

## 2. Методи на основі нейронних мереж:

- Дозволяють автоматизувати процес визначення оптимальних параметрів трансформації.

- Забезпечують високу якість зображення та швидкий час обробки.

- Використання нейронних мереж може бути ефективним для складних задач обробки зображень, таких як зміна масштабу, обертання та переключування.

## References

1. Chiou, J.-S. (2023). Investigating Effective Geometric Transformation for Image Augmentation to Improve Static Hand Gestures with a Pre-Trained Convolutional Neural Network. *Mathematics*, No. № 11 (23), Art. 4783.
2. Duchenne, O., Bach, F., Kweon, I. S., Ponce, J. (2011). A Tensor-Based Algorithm for High-Order Graph Matching. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, No. 33 (12), P. 2383–2395.
3. Simonyan, K., Zisserman, A. (2015). Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. In: *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
4. Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. E. (2012). ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. In: *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, P. 1097–1105.
5. Tuor, A., Kaplan, S., Hutchinson, B., Nichols, N., Robinson, S. (2017). Deep Learning for Unsupervised Insider Threat Detection in Structured Cybersecurity Data Streams. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*.
6. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015). Deep Learning. *Nature*, No. 521 (7553), P. 436–444.
7. Zhou, B., Khosla, A., Lapedriza, A., Oliva, A., Torralba, A. (2016). Learning Deep Features for Discriminative Localization. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, P. 2921–2929.
8. Szegedy, C., Vanhoucke, V., Ioffe, S., Shlens, J., Wojna, Z. (2016). Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, P. 2818–2826.

## Література

1. Chiou J.-S. Investigating Effective Geometric Transformation for Image Augmentation to Improve Static Hand Gestures with a Pre-Trained Convolutional Neural Network. *Mathematics*. 2023. № 11 (23). Art. 4783.
2. Duchenne O., Bach F., Kweon I. S., Ponce J. A Tensor-Based Algorithm for High-Order Graph Matching. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2011. № 33 (12). P. 2383–2395.
3. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. In: *Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015.
4. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. In: *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. 2012. P. 1097–1105.
5. Tuor A., Kaplan S., Hutchinson B., Nichols N., Robinson S. Deep Learning for Unsupervised Insider Threat Detection in Structured Cybersecurity Data Streams. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2017.
6. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning. *Nature*. 2015. No. 521 (7553). P. 436–444.
7. Zhou B., Khosla A., Lapedriza A., Oliva A., Torralba A. Learning Deep Features for Discriminative Localization. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. P. 2921–2929.
8. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J., Wojna, Z. Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision. In: *Proceedings of the IEEE Conference on*

9. He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. (2016). Deep Residual Learning for Image Recognition. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, P. 770–778.
10. Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., ... Adam, H. (2017). MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. arXiv preprint arXiv: 1704.04861.
- Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016. P. 2818–2826.
9. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. P. 770–778.
10. Howard A. G., Zhu M., Chen B., Kalenichenko D., Wang W., Weyand T., ... Adam H. MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. arXiv preprint arXiv: 1704.04861. 2017.

**MOSISA ALEX ALEMAIKHU**

Postgraduate student,  
Faculty of Electronics, Department of AMES,  
National Technical University of Ukraine  
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
Kyiv, Ukraine  
E-mail: [mosisa.alex@gmail.com](mailto:mosisa.alex@gmail.com)

**LATYSHEV YAN-VICTOR**

Postgraduate student,  
Faculty of Electronics, Department of AMES,  
National Technical University of Ukraine  
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
Kyiv, Ukraine  
E-mail: [yan.latyshev@gmail.com](mailto:yan.latyshev@gmail.com)

**MOSISA A. A., LATYSHEV Ya.-V. H.**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

### **COMPARATIVE ANALYSIS OF USING GEOMETRIC TRANSFORMATION ALGORITHMS TO IMPROVE PERFORMANCE IN MOBILE APPLICATIONS**

**Purpose.** Scientific research in the field of mobile technologies shows that every year there is an increasing need to optimize geometric transformation algorithms to improve the performance of graphic applications. This study is dedicated to the analysis of various image transformation methods, their impact on performance, and the quality of display in mobile applications.

**Methodology.** A comparative analysis of various geometric transformation algorithms was performed to determine the most effective ones for use in mobile graphic applications. Bilinear interpolation and affine transformations are considered as the primary methods, and the use of neural network-based methods is also evaluated.

**Findings.** It was found that the use of optimization algorithms for geometric transformation reduces response time, effectively uses resources, improves display quality, and increases the stability and reliability of applications.

**Originality.** A new approach to the application of neural network-based methods for geometric transformations is proposed, which allows automating the process of determining optimal transformation parameters.

**Practical value.** The use of the proposed methods contributes to the improvement of the performance of mobile graphic applications by optimizing response time and improving image quality.

**Keywords:** geometric transformation; performance optimization; mobile applications; algorithms; mathematical formulas.

УДК 004.42

ПОСВІСТАК В. С., МІРОШНИЧЕНКО Д. В.

Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

## ВИКОРИСТАННЯ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ ВІДДАЛЕНОГО КЕРУВАННЯ ДРОНОМ

**Мета.** Розробка системи віддаленої комунікації між наземною станцією та дроном, що інтегрованою із мікрокомп'ютером, із використанням мобільного інтернету та SMS-повідомлень.

**Методика.** Експерименти проводились на FPV-дроні, польотний контролер якого фізично інтегрованою із мікрокомп'ютером Raspberry Pi 5 через протокол UART. У якості джерела мобільного зв'язку використано мобільний USB-модем ZTE MF79U та SIM-карту одного із українських операторів. Орендовано та налаштовано віртуальний виділений сервер із ОС Ubuntu. Налаштовано MAVlink-комунікацію між дроном та наземною станцією із використанням сервера-посередника та програмного забезпечення MAVLink Router. Налаштовано допоміжні systemd-служби та розроблено bash-скрипти на сервері та мікрокомп'ютері дрона для ініціації з'єднання при увімкненні та відновлення у випадку його втрати. У якості програмного забезпечення наземної станції для планування місії використано додаток QGroundControl. Мобільний модем налаштовано для можливості використання у якості серійного порта, що підтримує AT-команди. Розроблено скрипти на мові Python для моніторингу отриманих SMS-повідомлень та автовідповідача.

**Результати.** Реалізовано комунікацію дрона із наземною станцією через мобільний інтернет, розроблено скрипти для комунікації з використанням SMS-повідомлень.

**Наукова новизна.** За результатами дослідження розроблено інструменти, при комбінації яких можна знизити вірогідність втрати комунікації між дроном і наземною станцією.

**Практична значимість.** Результати можуть бути використані при реалізації системи віддаленої комунікації між наземною станцією та дроном, і при плануванні автономних польотних місій.

**Ключові слова:** дрон; БПЛА; мобільний модем; мобільний роутер; наземна станція; планування місії БПЛА; MAVLink; MAVLink Router; Raspberry Pi; AT-команди.

**Вступ.** Класичне радіокерування дроном має свій ряд обмежень. Вибагливість до дистанції між дроном та ініціатором команд, чи то оператор, чи наземна станція з радіопередавачем робить керування на великих дистанціях проблематичним. Частково вирішити проблему дистанції можуть ретранслятори радіосигналу, проте вразливість до погодних умов, засміченість радіоканалів та інші радіоперешкоди у деяких випадках можуть призвести до втрати сигналу, а іноді і самого дрону. Для зменшення вірогідності виникнення вищезазначених проблем можливе використання резервних каналів комунікації, наприклад мобільного зв'язку – GSM/3G/4G/5G.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є огляд реалізації резервних каналів комунікації на дроні з допомогою мобільного зв'язку – інтернету та SMS-повідомлень. Мережа мобільного зв'язку стрімко розвивається у світі, з'являються нові покоління з покращеною якістю та швидкістю. У більшості країн, включно із Україною, присутня велика кількість вишок мобільного зв'язку, що передбачає наявність сигналу на більшій частині території. Мобільне інтернет-з'єднання, за умови його стабільності, є перспективним видом зв'язку для застосування на дроні [1, 2]. У якості резервного каналу комунікації на випадок відсутності інтернету можливе застосування SMS-повідомлень. Вони є економним та більш надійним варіантом комунікації, але можуть бути застосовані лише в певних обмежених випадках. Варто зазначити, що мобільний зв'язок також може бути вразливим до перешкод, таких як погодні умови, радіоелектронна боротьба тощо [3], тому основною метою його

застосування є зменшення вірогідності втрати контролю над дроном у випадку застосування виключно радіосигналу.

**Результати дослідження.** Сфера дронівих технологій та область їх застосування стрімко розвивається. Деякі польотні контролери дронів підтримують підключення додаткових радіомодулів телеметрії. Подібні модулі підключаються до самого польотного контролера та до пристрою із програмним забезпеченням наземної станції (рис. 1). Це дозволяє встановлювати між ними комунікацію, що відбувається через протокол MAVLink [4]. За умови наявності такого зв'язку, можливо керувати дроном із допомогою ПЗ, що підтримує MAVLink протокол, наприклад MAVProху. Більш просунуте програмне забезпечення для наземних станцій (MissionPlanner, QGroundControl та інші) дозволяє планувати складні польотні місії по заданих GPS точках, площах інтересу тощо [5].



Рис. 1. Модуль радіотелеметрії SiK

У даній роботі розглядається реалізація комунікації через мобільний зв'язок на прикладі класичного FPV-дрона із польотним контролером SpeedyBee F405 V3 із прошивкою ArduPilot, що фізично з'єднаний із мікрокомп'ютером Raspberry Pi 5 через протокол UART [6]. На Raspberry Pi 5 було встановлено SD-карту із операційною системою Raspberry Pi OS, що базується на дистрибутиві Debian. Наявність USB-портів робить можливим використання мобільного USB-модема ZTE MF79U. Даний модем використовує RNDIS протокол від Microsoft, що полегшує його цільове використання – комп'ютер розпізнає його як інтерфейс провідного підключення до інтернету. На ОС Linux присутні RNDIS драйвери, таким чином для підключення до інтернету достатньо вставити модем у USB-порт на Raspberry Pi.

Для організації зв'язку між наземною станцією та дроном можливо використовувати додаток MAVLink Router [7], що представляє собою двохсторонній форвардинг MAVLink повідомлень. MAVLink Router необхідно скопіювати та налаштувати як на дроні (для форвардингу повідомлень із польотного контролера на сервер через UART порти та навпаки), так і на сервері (для форвардингу повідомлень із дрона на наземну станцію та навпаки) – рис. 2.

Для комунікації сервера із дроном виділяється UDP порт, також MAVLink Router створює на окремому порті TCP-з'єднання, що можна використовувати у ПЗ наземної станції. Комунікація через TCP-порт відбувається після встановлення сесії. MAVLink Router підтримує налаштування портів та інших опцій через окремий конфігураційний файл – /etc/mavlink-router/main.conf. На рис. 3 показані налаштування UDP та TCP з'єднань на сервері. Це передбачає попередні налаштування фаєрволу з допомогою утиліти UFW – відкриті відповідні вихідні та вхідні з'єднання.

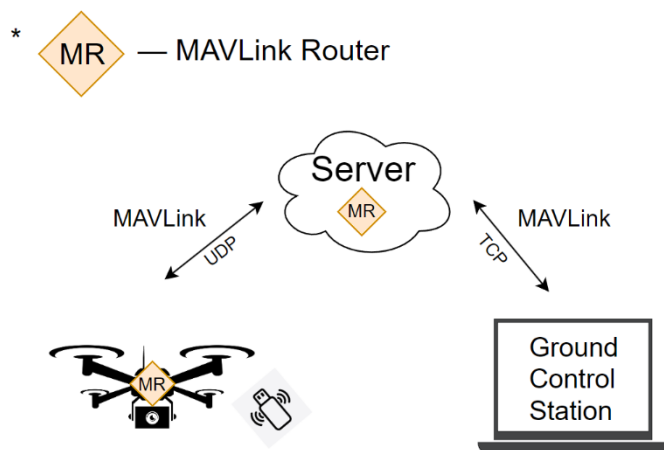


Рис. 2. Схема комунікації між дроном і наземною станцією

```
main@d-machine:~$ cat /etc/mavlink-router/main.conf
[General]
TcpServerPort=5761
MavlinkDialect=ardupilotmega
#DebugLogLevel=debug

[UdpEndpoint alpha]
Mode=server
Address=0.0.0.0
Port=14555
```

Рис. 3. Налаштування MAVLink Router на сервері

Для забезпечення коректної роботи запуск MAVLink Router можливо винести в окрему systemd службу. Таким чином можна налаштувати автозапуск при старті системи та аварійний перезапуск. Оскільки MAVLink Router передбачає підключення до інтернету, запускати його можна після успішної перевірки з'єднання із сервером Google з допомогою скрипта в умові ExecStartPre – рис. 4.

```
main@d-machine:~$ cat scripts/mavlink_router_config.sh
#!/bin/bash

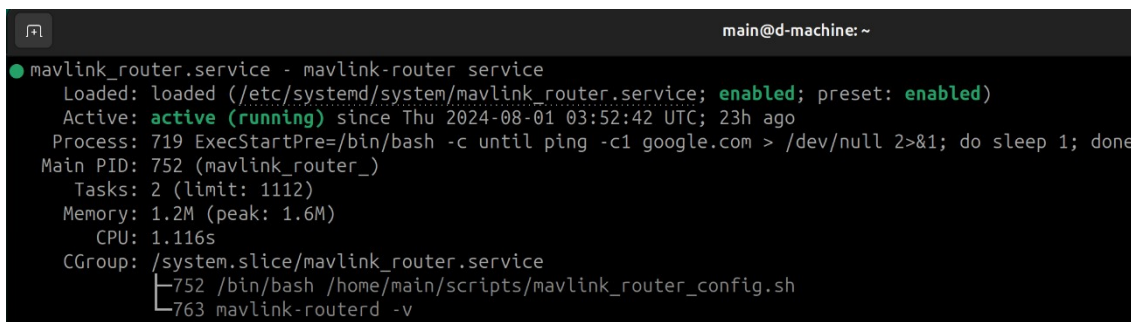
mavlink-routerd -v
main@d-machine:~$ cat /etc/systemd/system/mavlink_router.service
[Unit]
Description=mavlink-router service
After=network.target

[Service]
ExecStartPre=/bin/bash -c 'until ping -c1 google.com > /dev/null 2>&1; do sleep 1; done'
ExecStart=/home/main/scripts/mavlink_router_config.sh
WorkingDirectory=/home/main
StandardOutput=inherit
StandardError=inherit
Restart=always
RestartSec=10
User=main

[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

Рис. 4. Конфігурація systemd служби для MAVLink Router на сервері

Автозапуск при старті системи було активовано з допомогою команди `systemctl enable`. Перевірити статус служби можна командою `systemctl status`. При коректному налаштуванні служба буде запущеною і з активованим автозапуском (рис. 5).

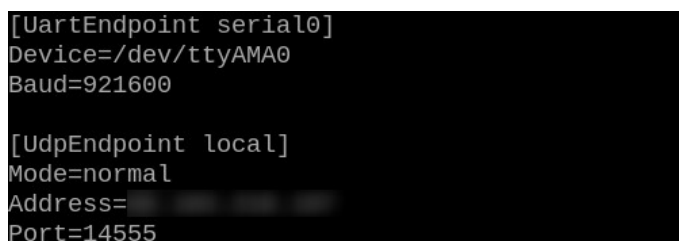


```
main@d-machine: ~  
● mavlink_router.service - mavlink-router service  
   Loaded: loaded (/etc/systemd/system/mavlink_router.service; enabled; preset: enabled)  
   Active: active (running) since Thu 2024-08-01 03:52:42 UTC; 23h ago  
     Process: 719 ExecStartPre=/bin/bash -c until ping -c1 google.com > /dev/null 2>&1; do sleep 1; done  
    Main PID: 752 (mavlink_router_)  
       Tasks: 2 (limit: 1112)  
      Memory: 1.2M (peak: 1.6M)  
         CPU: 1.116s  
    CGroup: /system.slice/mavlink_router.service  
            └─752 /bin/bash /home/main/scripts/mavlink_router_config.sh  
              └─763 mavlink-routerd -v
```

Рис. 5. Статус systemd служби для MAVLink Router на сервері

Налаштування MAVLink Router на мікрокомп'ютері Raspberry Pi, який інтегровано з дроном, буде подібним до сервера, крім конфігураційного файлу, де буде налаштований міст між серійним UART портом та UDP з'єднанням – див.

Рис. 6 – Baud rate – параметр, що визначає швидкість передачі даних через інтерфейс UART, вимірюється в бітах на секунду. Важливо, щоб його конфігурація співпадала із значенням, встановленим в налаштуваннях польотного контролера у прошивці ArduPilot – SERIALx\_BAUD, його можна встановити через додаток Mission Planner у вкладці Full Parameter List.



```
[UartEndpoint serial0]  
Device=/dev/ttyAMA0  
Baud=921600  
  
[UdpEndpoint local]  
Mode=normal  
Address=  
Port=14555
```

Рис. 6. Конфігурація мосту між UART та UDP на Raspberry Pi

Тепер за умови коректно працюючих служб MAVLink Router на Raspberry Pi та на сервері повинен відбуватися успішний обмін даними, про це свідчать логи служби на сервері, що можна переглянути з допомогою команди `journalctl` – рис. 7.

В налаштуваннях додатку для наземної станції QGroundControl необхідно додати підключення за протоколом TCP до нашого сервера, із відповідною IP-адресою та портом 5761. Після підключення акумуляторної батареї до дрона запускається Raspberry Pi та мобільний USB-модем. В середньому успішний запуск служби MAVLink Router займає до хвилини після підключення батареї, після чого повинно бути встановлене успішне з'єднання із наземною станцією. Додаток QGroundControl інформує про підключення дрона голосовим сповіщенням та зміною статусу підключення із Disconnected на Ready To Fly або Not Ready, залежно від режиму польоту та відповідних умов готовності. На головному екрані додатку показано карту, статус датчиків дрона, готовність, режим польоту, рівень заряду батареї та інші параметри. Дрон оснащено GPS-модулем, його позиція буде відображена на карті за умови наявності GPS-сигналу. Можливо змінити режим польоту, запустити мотори та запланувати польот по заданій місії – рис. 8.

```
main@d-machine: ~
1/-1 from 1/1
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: Known components:
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: 1/1
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: Message 147 to unknown sysid/compid: -1
/-1
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: > UDP [4]alpha: Got 40 bytes
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: Endpoint [4]alpha: got message 30 to -1
/-1 from 1/1
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: Known components:
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: 1/1
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: Message 30 to unknown sysid/compid: -1/
-1
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: > UDP [4]alpha: Got 30 bytes
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: Endpoint [4]alpha: got message 74 to -1
/-1 from 1/1
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: Known components:
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: 1/1
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: Message 74 to unknown sysid/compid: -1/
-1
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: > UDP [4]alpha: Got 24 bytes
Jul 31 17:43:14 d-machine mavlink_router_config.sh[763]: Endpoint [4]alpha: got message 178 to -
```

Рис. 7. Логи служби MAVLink Router на сервері при успішному обміні даних

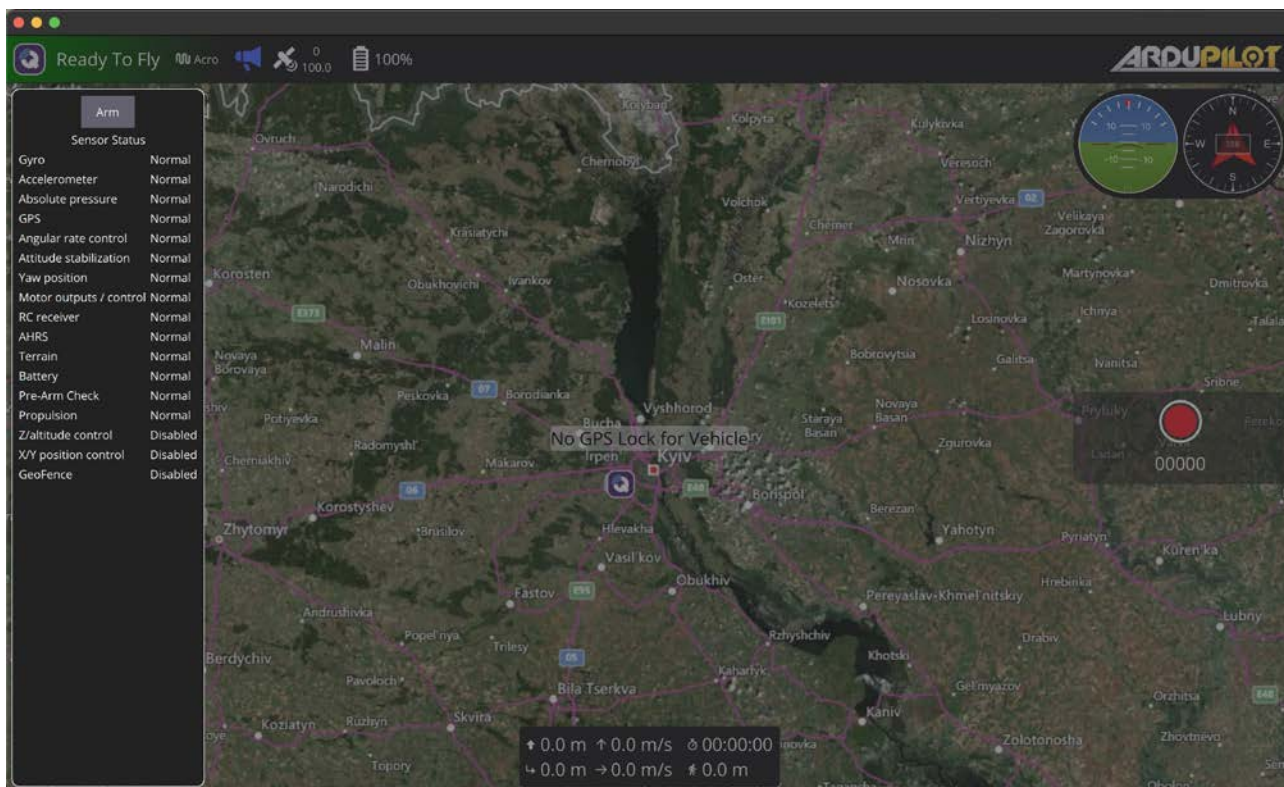


Рис. 8. Успішне підключення дрона у QGroundControl, статус датчиків

Після запуску моторів статус змінюється на Armed, а у випадку втрати сигналу – на Communication Lost. В налаштуваннях QGroundControl відображено статистику надісланих, отриманих та втрачених повідомлень MAVLink – рис. 9.

У випадку втрати інтернет-підключення зв'язок із наземною станцією буде перервано. У якості резервного каналу зв'язку можна використовувати SMS-повідомлення. Оскільки для

інтернет-підключення використовується мобільний модем із SIM-картою, є можливість використовувати його і для SMS-повідомлень, і немає необхідності придбання окремого GSM-модуля для Raspberry Pi. Низькорівнева комунікація модемів та телефонів із SIM-картами відбувається з допомогою AT-команд – спеціальної мови команд, розробленої у 1981 році для модемів [8]. За замовчуванням ZTE MF79U знаходиться в режимі RNDIS + Virtual CD-ROM (AT+ZMODE=0) [9], при підключенні до комп'ютера з'являється інтерфейс інтернет-підключення та віртуальний дисковод. Про це свідчить результат команди `lsusb`, із стандартним `productId` модема, 1405 – рис. 10.

```
MAVLink Link Status (Current Vehicle)
```

Total messages sent (computed):	17696
Total messages received:	17696
Total message loss:	0
Loss rate:	0%

Рис. 9. Статистика повідомлень MAVLink

```
master@machine:~$ lsusb | grep ZTE
Bus 001 Device 018: ID 19d2:1405 ZTE WCDMA Technologies MSM DEMO Mobile Boardband
```

Рис. 10. Результат команди `lsusb` для стандартного режиму модема ZTE MF79U

Для переключення в режим із AT портами необхідно інсталиувати утиліту `sg3-utils`, визначити назву віртуального пристрою CD-ROM та надіслати на нього SCSI-послідовність відповідного переключення (рис. 11).

```
master@machine:~$ virtual_cdrom_name=$(sg_scan -i 2>/dev/null | grep -1 "ZTE.*USB SCSI CD-ROM" |
head -1 | cut -d ":" -f1)
master@machine:~$ echo $virtual_cdrom_name
/dev/sg2
master@machine:~$ sg_raw -n $virtual_cdrom_name 99 00 00 00 00 00
NVMe Result=0x0
```

Рис. 11. Переключення модему в режим із AT портами

Після переключення режиму `productId` модему зміниться на 1602. AT-порти мають з'явитися із порядковими іменами `ttyUSB*` у папці `/dev/`. Якщо порти не з'являються автоматично, необхідно активувати серійні порти для модему власноруч (рис. 12).

```
master@machine:~$ modprobe usbserial
master@machine:~$ modprobe option
master@machine:~$ echo '19d2 1602 ff' | sudo tee /sys/bus/usb-serial/drivers/option1/new_id
19d2 1602 ff
```

Рис. 12. Активація серійних портів модему

Після цього з'являться порти, на які можна надсилати AT команди через командний інтерфейс, використовуючи утиліту `minicom` чи інші (рис. 13).

```
19d2 1602 ff
master@machine:~$ ls /dev | grep ttyUSB
ttyUSB0
ttyUSB1
master@machine:~$ minicom -D /dev/ttyUSB0
```

Рис. 13. Список серійних портів, запуск командного інтерфейсу minicom

Поточний режим модему має серійні порти, але протокол RNDIS відсутній. Режим AT+ZMODE=1 підтримує і серійні порти, і RNDIS протокол, тому дану команду необхідно надіслати на серійний порт модему. При успішній зміні режиму порт надсилає відповідь “OK”. Після цього необхідно перевстановити модем у USB-порт, productId поточного режиму – 0536. У випадку відсутності серійних портів, їх активація відбувається як вказано вище із новим productId пристрою. Вищезазначені дії було винесено в окремий bash-скрипт для зручного налаштування модему (рис. 14).

```
$ setup_dongle_mode.sh X
home > master > Documents > dev > sandbox > phd > usb_dongle > $ setup_dongle_mode.sh
1  #!/bin/bash
2
3  echo 'Determining virtual CDR0M name..'
4  cdrom_name=$(sg_scan -i 2>/dev/null | grep -l "ZTE.*USB SCSI CD-ROM" | head -1 | cut -d ":" -f1)
5  echo $cdrom_name
6
7  echo 'Changing USB dongle mode..'
8  sg_raw -n $cdrom_name 99 00 00 00 00 00
9
10 echo 'Creating ttyUSB devices..'
11 modprobe usbserial
12 modprobe option
13 echo '19d2 1602 ff' > /sys/bus/usb-serial/drivers/option1/new_id
14 ls /dev | grep ttyUSB*
15
16 echo "Executing AT commands.."
17 echo "AT+ZMODE=1" | /home/home/bin/atinout - /dev/ttyUSB0 -
18 sleep 2
19 echo "AT+SOFTRESET" | /home/home/bin/atinout - /dev/ttyUSB0 -
20 sleep 2
21
22 echo "Finished, please unplug and plug in the dongle"
23 exit 0
```

Рис. 14. Скрипт для налаштування режиму модему RNDIS + AT

Після активації серійних портів є можливість виконання низькорівневих AT команд на модемі, що дозволяє моніторити отримані смс, та надсилати смс у відповідь [10, 11]. Python-модуль pyserial реалізує можливість комунікації із серійними портами [12]. Для зручного парсингу SMS-повідомлень необхідно перейти у текстовий режим з допомогою команди AT+CMGF=1, та встановити набір символів GSM командою AT+CSCS="GSM". AT+CPMS дозволяє обрати бажане місце зберігання SMS-повідомлень при читанні, видаленні, надсиланні та отриманні нових повідомлень [13]:

- SM – пам'ять на SIM-карті;
- ME – пам'ять модему;
- MT – об'єднана пам'ять SM та ME;
- BM, SR, TA – службова пам'ять для різних цілей.

AT+CSMP налаштовує параметри текстового режиму, необхідні для отримання та надсилання повідомлень. Для початкового налаштування модему та моніторингу реалізовано окремі функції (рис. 15).

```
monitor_messages.py > ...
1  import time
2
3  from at import invoke_at_silent
4  from sms_message import extract_sms_messages
5
6  def setup_at(serial):
7      invoke_at_silent(serial, 'AT+CMGF=1')
8      invoke_at_silent(serial, 'AT+CSCS="GSM"')
9      invoke_at_silent(serial, 'AT+CPMS="SM","SM","SM"')
10     invoke_at_silent(serial, 'AT+CSMP=17,167,0,0')
11
12
13 def monitor_sms_messages(serial, on_message_received, polling_interval_ms=500):
14     is_first_iteration = True
15     cached_messages = []
16     while True:
17         try:
18             invoke_at_silent(serial, 'AT+CMGL="ALL"')
19             time.sleep(polling_interval_ms / 1000)
20             messages = extract_sms_messages(serial.read(serial.in_waiting).decode())
21             new_messages = set(messages) - set(cached_messages)
22             cached_messages = messages
23
24             if is_first_iteration:
25                 is_first_iteration = False
26                 continue
27
28             if len(new_messages) == 0:
29                 print("No new messages")
30                 continue
31
32             for msg in new_messages:
33                 on_message_received(msg)
34     except Exception as e:
35         print(f"Error occurred: {e}")
```

Рис. 15. Функції для початкового налаштування модему та моніторингу SMS-повідомлень

Варто зазначити, що навіть із наявністю SD-карти у модемі ZTE MF79U, через специфіку прошивки пристрою ME або MT пам'ять працює некоректно, не зберігаючи SMS-повідомлення взагалі. Єдиний можливий варіант – зберігати повідомлення у пам'яті SM, що має 10 вільних місць для повідомлень, тому можливо реалізувати автоматичне очищення після прочитання. Результатом команди AT+CMGL="ALL" є список рядків із значеннями, розділеними комою. Для парсингу повідомлень реалізовано окремі функцію та клас (рис. 16 та рис. 17).

```
21 def extract_sms_messages(at_cmgl_output):
22     line_to_ignore_pattern = [
23         # "\\+CMGL.*",
24         "\\+ZEPCG.*",
25         "\\+CMTI.*",
26         "OK",
27         "\\>.*",
28     ]
29     sms_metadata_line_pattern = "\\+CMGL.*"
30
31     metadata = []
32     messages = []
33
34     for line in at_cmgl_output.split('\n'):
35         line = line.replace('\r', '')
36         should_ignore = False
37         for regex in line_to_ignore_pattern:
38             if re.match(regex, line):
39                 should_ignore = True
40                 break
41
42         if should_ignore:
43             continue
44
45         if re.match(sms_metadata_line_pattern, line):
46             metadata.append(line)
47         else:
48             messages.append(line)
49
50     metadata = list(filter(None, metadata))
51     messages = list(filter(None, messages))
52     messages_by_metadata = zip_longest(metadata, messages)
53     return [SmsMessage(metadata, message) for metadata, message in messages_by_metadata]
```

Рис. 16. Парсинг SMS-повідомлень

```
5 class SmsMessage:
6     def __init__(self, metadata_line, message):
7         print(metadata_line)
8         values = metadata_line.split(',')
9         self.status = values[1].replace(' ', '')
10        self.sender = values[2].replace(' ', '')
11        self.date = f"{values[4]} {values[5]}".replace(' ', '')
12        self.message = message
13
14    def __eq__(self, other):
15        return self.sender == other.sender and self.date == other.date and self.message == other.message
16
17    def __hash__(self):
18        return hash((self.sender, self.date, self.message))
```

Рис. 17. Структура класу для SMS-повідомлень

Для експериментів реалізовано окрему функцію для надсилання повідомлень. В основному скрипті вона використовується у відповідь на повідомлення від «надійного відправника», що є верифікованим номером (рис. 18).

Скрипт моніторить повідомлення, у випадку отримання повідомлення від надійного відправника – спрацьовує автовідповідач із еквівалентним текстом – див. логи скрипту на рис. 19.

```
main.py > ...
1  import serial
2
3  from monitor_messages import monitor_sms_messages, setup_at
4  from send_sms import send_sms
5  from utils import clear_sms_memory
6
7  trusted_sender = "+380501234567"
8  port = "/dev/ttyUSB0"
9  serial = serial.Serial(port, 460800, rtscts=True, dsrdtr=True, timeout=5)
10
11
12 def handle_sms_message(msg):
13     if msg.sender != trusted_sender:
14         print(f"Received message from untrusted sender {msg.sender}")
15         return
16
17     print(f"Received message from {msg.sender}: {msg.message}")
18     send_sms(serial, msg.sender, msg.message)
19
20
21 try:
22     clear_sms_memory(serial)
23     setup_at(serial)
24     monitor_sms_messages(serial, lambda msg: handle_sms_message(msg))
25 finally:
26     serial.close()
27
```

Рис. 18. Основний скрипт для моніторингу повідомлень та автовідповідача

```
No new messages
AT+CMGL="ALL "
No new messages
AT+CMGL="ALL "
+CMGL: 1,"REC UNREAD", "+380 [REDACTED]", "", "24/08/02,11:35:46+12"
Received message from +380 [REDACTED] : Test
AT+CSMP=17,167,0,0
AT+CMGS="+380 [REDACTED] "
Test
```

Рис. 19. Логи основного скрипту при спрацюванні автовідповідача

При реалізації комунікації із дроном можливо визначити певний формат повідомлень-команд, важливо враховувати що SMS-повідомлення технічно підтримує до 160 символів, чого достатньо для критично важливих команд, аж до задання списку координатів для польоту. У випадку потенційного перевищення ліміту можливо вдосконалити формат команд для його надсилання декількома SMS-повідомленнями. Запуск скриптів моніторингу SMS-повідомлень можливо організувати у вигляді systemd служби з автозапуском, по аналогії із вищезазначеними службами для MAVLink Router.

**Висновки.** У цій роботі була досліджена реалізація комунікації між дроном та наземною станцією із використанням MAVLink Router та сервера-посередника. У якості джерела інтернет-підключення на дроні було використано мобільний USB-модем із SIM-картою. Даний модем було налаштовано для активації серійних портів, що підтримують AT команди, які необхідні для отримання та надсилання SMS-повідомлень у якості резервного каналу зв'язку для дрона. Реалізовано скрипти на мові Python для моніторингу повідомлень та автовідповідача.

Необхідні подальші дослідження для визначення оптимального формату команд, що будуть надсилатись із допомогою SMS-повідомлень. При цьому варто враховувати обмеження у 160 символах та конкретні потреби у функціоналі дрона.

Є потреба у використанні підпису MAVLink повідомлень, доступному у MAVLink v2, що покращує безпеку MAVLink комунікації. Також необхідні дослідження та експерименти у питаннях безпеки для уникнення можливих атак із метою перехоплення дрона чи переривання його зв'язку із наземною станцією.

### References

### Література

1. Lin, X. et al. (2019). Mobile Network-Connected Drones: Field Trials, Simulations, and Design Insights. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 14, No. 3, P. 115–125, DOI: 10.1109/MVT.2019.2917363.
  2. Burke, P. J. (2019). A Safe, Open Source, 4G Connected Self-Flying Plane With 1 Hour Flight Time and All Up Weight (AUW) <math>\leq 300</math> g: Towards a New Class of Internet Enabled UAVs. *IEEE Access* (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)), Vol. 7, P. 67833–67855, DOI: 10.1109/access.2019.2917851.
  3. Ramirez, D. J. (2014). Interference mitigation techniques for 4G networks. Supélec.
  4. Messages (common) MAVLink Developer Guide. *mavlink.io*. URL: <https://mavlink.io/en/messages/common.html>.
  5. Ramirez-Atencia, C., Camacho, D. (2018). Extending QGroundControl for Automated Mission Planning of UAVs. *Sensors* (MDPI AG), Vol. 18, No. 7, P. 2339, DOI: 10.3390/s18072339.
  6. Communicating with Raspberry Pi via MAVLink – Dev documentation. *ardupilot.org*. URL: <https://ardupilot.org/dev/docs/raspberry-pi-via-mavlink.html>.
  7. MAVLink Router. *GitHub*. Apr. 25, 2023. URL: <https://github.com/mavlink-router/mavlink-router>.
  8. Telit Wireless Solutions (2006). AT Commands Reference Guide.
  9. Opensource. *opensource.ztedevices.com*. URL: <https://opensource.ztedevices.com/>
1. Lin X. et al. Mobile Network-Connected Drones: Field Trials, Simulations, and Design Insights. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2019. Vol. 14, No. 3. P. 115–125. DOI: 10.1109/MVT.2019.2917363.
  2. Burke P. J. A Safe, Open Source, 4G Connected Self-Flying Plane With 1 Hour Flight Time and All Up Weight (AUW) <math>\leq 300</math> g: Towards a New Class of Internet Enabled UAVs. *IEEE Access* (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)). 2019. Vol. 7. P. 67833–67855. DOI: 10.1109/access.2019.2917851.
  3. Ramirez D. J. Interference mitigation techniques for 4G networks. Supélec, 2014.
  4. Messages (common) MAVLink Developer Guide. *mavlink.io*. URL: <https://mavlink.io/en/messages/common.html>.
  5. Ramirez-Atencia C., Camacho D. Extending QGroundControl for Automated Mission Planning of UAVs. *Sensors* (MDPI AG). 2018. Vol. 18, No. 7. P. 2339. DOI: 10.3390/s18072339.
  6. Communicating with Raspberry Pi via MAVLink – Dev documentation. *ardupilot.org*. URL: <https://ardupilot.org/dev/docs/raspberry-pi-via-mavlink.html>.
  7. MAVLink Router. *GitHub*. Apr. 25, 2023. URL: <https://github.com/mavlink-router/mavlink-router>.
  8. Telit Wireless Solutions. AT Commands Reference Guide. 2006.
  9. Opensource. *opensource.ztedevices.com*. URL: <https://opensource.ztedevices.com/>

- |   |   |
|---|---|
| 10. Send SMS using AT commands. <i>www.smssolutions.net</i> . URL: <a href="https://www.smssolutions.net/tutorials/gsm/sendsmsat/">https://www.smssolutions.net/tutorials/gsm/sendsmsat/</a>                      | 10. Send SMS using AT commands. <i>www.smssolutions.net</i> . URL: <a href="https://www.smssolutions.net/tutorials/gsm/sendsmsat/">https://www.smssolutions.net/tutorials/gsm/sendsmsat/</a>                      |
| 11. Receiving SMS messages using AT commands. <i>www.smssolutions.net</i> . URL: <a href="https://www.smssolutions.net/tutorials/gsm/receivesmsat/">https://www.smssolutions.net/tutorials/gsm/receivesmsat/</a>  | 11. Receiving SMS messages using AT commands. <i>www.smssolutions.net</i> . URL: <a href="https://www.smssolutions.net/tutorials/gsm/receivesmsat/">https://www.smssolutions.net/tutorials/gsm/receivesmsat/</a>  |
| 12. pySerial. <i>GitHub</i> . Mar. 14, 2022. URL: <a href="https://github.com/pyserial/pyserial">https://github.com/pyserial/pyserial</a> .   | 12. pySerial. <i>GitHub</i> . Mar. 14, 2022. URL: <a href="https://github.com/pyserial/pyserial">https://github.com/pyserial/pyserial</a> .   |
| 13. SMS Tutorial: Preferred Message Storage (AT+CPMS). <i>www.developershome.com</i> . URL: <a href="https://www.developershome.com/sms/cpmsCommand.asp">https://www.developershome.com/sms/cpmsCommand.asp</a> . | 13. SMS Tutorial: Preferred Message Storage (AT+CPMS). <i>www.developershome.com</i> . URL: <a href="https://www.developershome.com/sms/cpmsCommand.asp">https://www.developershome.com/sms/cpmsCommand.asp</a> . |

**POSVISTAK VALERII**

Postgraduate Student,  
Faculty of Mechatronics and Computer Technologies,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0001-7785-1378>  
E-mail: [valposv@gmail.com](mailto:valposv@gmail.com)

**MIROSHNYCHENKO DMYTRO**

Postgraduate Student,  
Faculty of Mechatronics and Computer Technologies,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0002-0904-1645>  
E-mail: [dmiroshnycheko@gmail.com](mailto:dmiroshnycheko@gmail.com)

**POSVISTAK V. S., MIROSHNYCHENKO D. V.**

*Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*

### **USAGE OF MOBILE NETWORK FOR REMOTE DRONE**

**Purpose.** Developing a system of remote communication via mobile internet and SMS messages between a ground control station and a drone integrated with a microcomputer.

**Methodology.** Experiments were conducted on an FPV-drone with a flight controller that is physically integrated with a Raspberry Pi 5 microcomputer via UART protocol. As a mobile network source a mobile USB-dongle with a Ukrainian SIM-card was used. An Ubuntu virtual private server was rented and set up. MAVLink communication between the drone and a ground control station was set up using MAVLink Router application and a middleware server. Helper systemd services and bash scripts were set up on the server and the drone microcomputer to initiate a connection on system start and in case of failure. As a ground control system QGroundControl was used. Mobile USB-dongle was set up to support serial ports which accept AT commands. Python scripts to monitor and send SMS messages were developed.

**Findings.** Implemented communication between a drone and a ground control station via mobile network.

**Originality.** According to the results of the research, developed instruments with combination of which the risk of communication loss between a drone and a ground control station can be reduced.

**Practical value.** The results can be used to implement a remote communication system between a drone and a ground control station and to plan autonomous flight missions.

**Keywords:** drone; UAV; mobile modem; mobile router; mobile USB-dongle; ground control station; UAV mission planning; MAVlink; MAVLink Router; Raspberry Pi; AT commands.

УДК 004.89

ТРОФИМЕНКО О. Г., СОКОЛОВ А. В., ЧИКУНОВ П. О.,  
АХМАМЕТЬЄВА Г. В., МАНАКОВ С. Ю.

Національний університет «Одеська юридична академія», Україна

## ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У ВІЙСЬКОВІЙ КІБЕРСФЕРІ

**Мета.** Аналіз ролі штучного інтелекту (ШІ) для забезпечення кібербезпеки військових мереж та можливості застосування ШІ у галузі кібербезпеки оборонної сфери.

**Методика.** При проведенні дослідження були використані методи аналізу наукових та літературних джерел, інформаційного пошуку, порівняння та узагальнення.

**Результати.** Проведено порівняння та аналіз наявної у відкритому доступі інформації про технології та інструменти кібербезпеки на основі ШІ. В результаті проведеного наукового аналізу встановлено, що інструменти ШІ відіграють важливу роль у виявленні та стримуванні загроз несанкціонованих вторгнень у систему безпеки військової мережі. З'ясовано, що ШІ наразі є необхідністю для кожної комп'ютерної системи та мережі. Використання технологій ШІ у формі інтелектуальних агентів є доволі ефективним інструментом для захисту від кібератак та оцінювання вразливостей і ризиків у кіберпросторі. Під час цілодобового потокового аналізу великих обсягів даних у режимі реального часу ШІ здатен визначати закономірності та надавати рекомендації щодо можливого усунення виявлених вразливостей. Програмне забезпечення для кіберзахисту на основі ШІ реагує на атаки, ізолюючи уражені системи.

**Наукова новизна.** Проаналізовано та систематизовано сфери можливого застосування ШІ у військових кіберопераціях. Розглянуто технології машинного та глибинного навчання, штучних нейронних мереж для ідентифікації та прогнозування кіберзагроз.

**Практична значимість.** Отримані результати проведеного аналізу вказують на потужний потенціал використання інтелектуальних технологій та інструментів для військової галузі. Технології ШІ надає кібербезпечивим командам гнучкість, масштабованість та можливість автоматизації виявлення загроз. Впровадження ШІ у кібербезпеку військової сфери здатне суттєво зменшити кіберризик, скоротити витрати й оптимізувати процеси виявлення, дослідження, реагування та моніторингу кіберзагроз у реальному часі. Робота сприяє інтенсифікації проактивного виявлення та аналізу потенційних кіберзагроз у поєднанні з діями реагування на інциденти та загрози у боротьбі з кіберзлочинністю. Зрештою, ці досягнення допоможуть нашому кібервійську бути краще підготовленим й оснащеним до викликів і ризиків сучасної війни.

**Ключові слова:** штучний інтелект (ШІ); кібербезпека; ризики кіберзагроз; військова галузь; тестування; машинне навчання; глибоке навчання; нейронні мережі.

**Вступ.** Через високий рівень ризиків витоків даних у військових та оборонних мережах важко переоцінити переваги застосування технологій штучного інтелекту (ШІ, Artificial Intelligence, AI) для кібербезпеки. Величезні обсяги розвідувальних даних з одного боку та небезпеки їх витоків з іншого зумовлюють високий рівень пріоритету кібербезпеки для армії та уряду будь-якої держави світу. Завдяки використанню систем ШІ полегшується збір, аналіз та класифікація великих обсягів даних. Штучний інтелект може відігравати важливу роль у профілактичних заходах для військових, щоб ідентифікувати та оцінювати зловмисне програмне забезпечення.

Проведений аналіз наявних досліджень свідчить про важливість дослідження можливих сфер застосування ШІ у військовій кібербезпеці, а повсюдне впровадження технологій ШІ потребує підвищеної уваги до цього напрямку, й відповідно, глибокого висвітлення питань потенційних переваг та ризиків впровадження ШІ в кібербезпеку оборонного сектора. Дослідження [1] вивчає людиноорієнтовану концепцію ШІ у військових кіберопераціях, ілюструє способи встановлення пріоритетів залучення та взаємодії людини, людського розуміння, ефективного ухвалення рішень та етичних міркувань під час створення

та проведення військових кібероперацій. Стаття [2] досліджує можливий вплив ШІ на глобальну кібербезпеку. У роботі [3] відзначено, що інвестиції у розробку та впровадження ШІ та робототехніки у військову сферу дозволять зменшити ризики для життя людей і скоротити витрати. Автори цієї статті звертають увагу на те, що наразі сфери спостереження, розвідки та кібероперацій можуть ефективно функціонувати лише за допомогою ШІ. Автори статті [4] порівняли особливості військового ШІ, зосередженого на цілях стратегічної оборони, з цивільним ШІ. У роботі [5] дійшли висновку, що ШІ став незамінною інновацією для мережевої безпеки. Робота [6] називає національну безпеку та кібербезпеку одними з ключових сфер можливого застосування штучного інтелекту в армії, разом зі сферами транспорту, логістики та навчальної бойової підготовки.

**Визначення мети дослідження.** Основною метою даної роботи є аналіз ролі ШІ для забезпечення кібербезпеки військових мереж та можливості застосування ШІ у галузі кібербезпеки оборонної сфери.

#### **Результати дослідження.**

**1. ШІ для ідентифікації та прогнозування кіберзагроз.** Інтелектуальний аналіз великих масивів текстових, графічних, аудіо та відео даних дозволяють виявляти потенційні терористичні загрози, формувати доказову базу підготовки правопорушень задля їх ефективного застосування у сфері безпеки.

Кваліфіковані зловмисники вишукують і винаходять нові способи та інструменти проникнення, щоб завдати серйозної шкоди. Вони здійснюють атаки й використовують різноманітні способи поширення шкідливого програмного забезпечення, яке може залишатися прихованими в системі тривалий час. Наразі кіберзлочинність викрадає приблизно 1% світового ВВП [7]. Кіберзагрози стрімко розвиваються, а тому застосування брандмауерів та антивірусного програмного забезпечення вже недостатньо [8]. Потрібні більш інтелектуальні інструменти на основі ШІ, які з часом тільки підвищують ефективність та точність виявлення загроз, покращують розуміння користувачами активних кіберзагроз, відкривають інноваційні шляхи розвитку для забезпечення кібербезпеки, у тому числі й заходи превентивного характеру [9].

Використання ШІ для виявлення й аналізу загроз не лише покращує точність і швидкість цих процесів, а й масштабує операції безпеки для ефективного керування зростаючим обсягом кіберзагроз. Завдяки аналізу наявних ретроспективних даних та поточних тенденцій, ШІ моделює прогнозну аналітику для передбачення потенційних порушень безпеки. ШІ здатен передбачити появу вразливості та запропонувати запобіжні заходи, що надає змогу організаціям усунути недоліки, перш ніж їх використають злочинці [10]. Тим самим ШІ покращує профілактичні заходи безпеки та посилює загальну кіберстійкість.

#### **2. Використання технологій ШІ в кібербезпеці.**

**Машинне навчання.** Використання машинного навчання (Machine Learning, ML) у програмних продуктах безпеки дозволяє ідентифікувати та прогнозувати загрози до того, як вони вплинуть на військові мережі інтернету речей (IoT). Ідентифікація технічних та програмних інструментів для імплантації зловмисного програмного забезпечення та подальша нейтралізація кіберзагроз у військовій сфері за допомогою ML можлива ще до того, як зловмисне програмне забезпечення почне активуватися. ШІ та ML аналізують поведінку мережі, виявляють аномалії, розрізняючи законні транзакції від шахрайських [11]. ML використовується для пошуку й виявлення зловмисних сценаріїв, первинних заражень, визначення пріоритетів впливу та стримування загроз вторгнення в систему безпеки військової мережі. Алгоритми ШІ сканують та вивчають поведінку файлів та вміст електронних листів на ознаки фішингу, щоб виявити шаблони, схожі на зловмисне програмне

забезпечення. Загалом традиційне антивірусне програмне забезпечення покладається на відомі сигнатури шкідливих програм, а ШІ відстежує і вивчає дії зловмисного програмного забезпечення, щоб знайти навіть невідомі варіанти.

**Глибоке навчання.** ШІ використовує глибоке навчання (Deep Learning, DL) для виявлення складних загроз зловмисних програм, які оминають звичайні заходи безпеки. Глибоке навчання, яке імітує здатність людського мозку навчатися з великої кількості даних, використовується для виявлення складних закономірностей і аномалій, які зазвичай важко вловити традиційними методами. Це дозволяє запобігати та виявляти розширені постійні загрози (Advanced Persistent Threat, APT), інсайдерські загрози та обхідні атаки, які не помічають традиційні заходи безпеки [12]. Завдяки постійному навчанню алгоритми ШІ вдосконалюються і можуть відрізнити законні дії від потенційних загроз, зменшуючи хибні спрацьовування. Це покращує аналіз загроз та зміцнює захист від нових загроз ще до того, як вони виникнуть. При цьому суттєвим є те, що системи виявлення загроз на основі ШІ обробляють величезні обсяги даних у реальному часі для виявлення загроз у мережах. Тим самим скорочується частка ручного аналізу, що прискорює виявлення та ефективне реагування на небезпеки.

**Штучні нейронні мережі.** Нейронні мережі мають широке застосування в галузі інформаційної безпеки. Вони можуть аналізувати шаблони мережевого трафіку, щоб виявляти загрози безпеці, зловмисне програмне забезпечення та несанкціоновані вторгнення. Вони здатні ідентифікувати незвичні шаблони в мережевих діях, активувати сповіщення системи безпеки, що дозволяє вживати профілактичні заходи. Нейронні мережі можна використовувати в процесах розпізнавання особи та автентифікації. Аналізуючи закономірності та відповідні ознаки ідентичності особи, ці методи можуть перевірити й визначити, чи є ця особа авторизованою, чи ні [13]. Тому нейронні мережі здатні ідентифікувати підозрілі моделі поведінки та тенденції у фінансових операціях, щоб виявляти шахрайство у фінансовій сфері, онлайн-платежах і банківських системах [14]. Також нейронні мережі можна використовувати в процесах шифрування та дешифрування інформації, позаяк вони можуть використовувати можливості глибокого навчання для розробки та ідентифікації складних алгоритмів шифрування та дешифрування [15]. Важливо відзначити, що в будь-якому домені безпеки використання нейронних мереж вимагає точності та повного розуміння загроз безпеці та можливих обмежень. Крім того, при використанні нейронних мереж у безпеці слід приділяти належну увагу збереженню конфіденційності даних.

**3. Інструменти ШІ для кібербезпеки.** Отже, в системах виявлення вторгнень і системах безпеки можна використовувати різні технології ШІ та їх комбінації. Так, запропонована у травні 2024 року платформа Google Threat Intelligence для автоматизації аналізу кіберзагроз, завдяки використанню можливостей генеративного ШІ, поєднує та аналізує дані з різних джерел і здатна швидко виявляти та класифікувати загрози [16]. Іншими прикладами сучасних інструментів для виявлення кіберзагроз, які використовують технології ШІ є: Darktrace (<https://darktrace.com>), Cylance (<https://login.cylance.com>), Vectra AI (<https://www.vectra.ai>), SentinelOne (<https://www.sentinelone.com>), Cybereason (<https://www.cybereason.com/>), McAfee MVISION (<https://www.mcafee.com/>), FortiAI (<https://www.fortinet.com/>) тощо. Ці інструменти використовують дещо різні підходи, алгоритми та технології (ML, DL, прогнозу аналітику для виявлення загроз, реагування на інциденти та захисту конфіденційних даних у режимі реального часу).

Добре зарекомендувала себе синергічна взаємодія між платформою розширеного виявлення та реагування на інциденти безпеки (eXtended Detection and Response, XDR), операційним центром безпеки (Security Operations Center, SOC), зосередженим на управлінні загрозами і вразливостями, проактивному моніторингу інцидентів, та набором інструментів і

методів для дослідження подій, важливих для кібербезпеки (Security Information and Event Management, SIEM) [17]. Саме SIEM із використанням ШІ та машинного навчання дає змогу стандартизовано використовувати дані журналізації транзакцій з різних інструментів безпеки та забезпечує розширений моніторинг великих наборів даних шляхом збору й аналізу подій безпеки і контекстних джерел даних у реальному часі. Хмарна платформа XDR за допомогою ШІ оптимізує процеси виявлення, дослідження, реагування та моніторингу кіберзагроз у реальному часі. XDR враховує найдрібніші деталі, сприяючи виявленню раніше непомічених загроз. Завдяки використанню потужностей аналізу великих даних, XDR надає кібербезпековим командам гнучкість, масштабованість та можливість автоматизації виявлення загроз. Ці інструменти із застосуванням технологій ШІ допомагають інтенсифікувати проактивне виявлення та аналіз потенційних кіберзагроз у поєднанні з діями реагування на інциденти та загрози у боротьбі з кіберзлочинністю [18].

Системи ШІ в армії тісно взаємопов'язані з іншими системами і через це вразливі до кібератак. Зловмисне використання ШІ може завдати значної шкоди військовій інфраструктурі, персоналу та операціям. Крім того, кібератаки на основі ШІ складно виявити та запобігти їм. Тому інструменти кібербезпеки на основі ШІ наразі є необхідністю для кожної комп'ютерної системи та мережі. Їх використання є проактивним кроком реагування задля зменшення ризиків кіберзагроз і кіберзлочинів. Інтеграція інструментів ШІ в систему дозволяє автоматизувати процес виявлення ризиків витоків даних, захисту від розподілених атак на відмову в обслуговуванні (DDoS) та стримування загроз несанкціонованих вторгнень у систему безпеки військової мережі.

**4. Інтелектуальні методи автентифікації.** Системи контролю доступу користувачів на основі ШІ пропонують надійні рішення автентифікації. Традиційні методи автентифікації, які використовують паролі, більш вразливі до злому через можливе повторне використання пароля у разі викрадення облікових даних. Донедавна двофакторна автентифікація була найкращим способом захисту профілів користувачів. Залучення до цього процесу ШІ дозволило сформувати нові рівні захисту для перевірки особи за допомогою розширених метаданих безпеки. Для автентифікації ШІ додатково враховує фактори біометрії та моделі поведінки користувачів, наприклад: динаміку натискання клавіш, розпізнавання обличчя та голосу. Тим самим поведінкова біометрія здатна забезпечити безпечну автентифікацію, навіть без пароля. Використання поведінкової біометрії, відбитків пальців та іншої контекстної інформації для розширеної багатофакторної автентифікації суттєво ускладнюють доступ неавторизованим користувачам, навіть у випадку викрадення облікових даних.

Загрози кібербезпеці бувають різних форм і розмірів. Хакери полюють за секретами як військових, так і приватних організацій. Використання технологій ШІ у формі інтелектуальних агентів є доволі ефективним інструментом для захисту від кібератак та оцінювання вразливостей і ризиків у кіберпросторі. Автоматизація на основі ШІ спрощує рутинні завдання логічного тестування відповідності законодавчим правилам і нормам кібербезпеки та захисту персональних даних, дозволяючи командам із кібербезпеки зосередитися на більш важливих справах, що допускає номінальне залучення до процесів із заміщенням осіб із числа військових. Оптимізація робочих процесів відбувається шляхом сповіщення та попередження персоналу відділу кібербезпеки про наявні виявлені невідповідності та ризики загроз [19]. Під час цілодобового потокового аналізу великих обсягів даних у режимі реального часу ШІ здатен визначати закономірності та надавати рекомендації щодо можливого усунення виявлених вразливостей. Програмне забезпечення для кіберзахисту на основі ШІ реагує на атаки, ізолюючи уражені системи. При цьому шляхом самостійного навчання та глибокого аналізу даних з часом ШІ зменшує похибку і пропонує більш точні способи боротьби з кіберзагрозами, розробляє розумні методи можливого

усунення складних загроз, підходи до трансформації й оптимізації традиційних методів захисту інформації.

**Висновки.** Проведене дослідження з'ясувало великий потенціал використання ШІ у військовій кібербезпеці. Наразі фахівці з кібербезпеки часто використовують ШІ як засіб захисту від різних форм атак. Системи безпеки на основі ШІ сканують на наявність зловмисного програмного забезпечення та ізолюють підозрілі файли або ж блокують доступ у разі несанкціонованих спроб зловмисників отримати конфіденційні дані. Це робить їх чудовим інструментом у виявленні нових, незнайомих штамів шкідливих програм, які традиційне антивірусне програмне забезпечення може пропустити. Тим самим ШІ допомагає експертам з кібербезпеки зменшити ризики злому та посилити безпеку шляхом аналізу та виявлення загроз.

Використання різних технологій ШІ дозволяє в режимі реального часу знаходити та класифікувати шаблони та аномалії, які можуть залишитися непоміченими людьми. Можливості ШІ до аналізу даних дозволяють моніторити поведінку пристроїв та виявляти потенційні загрози безпеці, навіть коли пристрої перебувають в офлайн-режимі. І хоча програмні системи кібербезпеки на базі ШІ мають певні ризики, проте партнерство між людьми та ШІ здатне створити більш безпечне майбутнє в діяльності військовослужбовців.

## References

## Література

1. Maathuis, C. (2024). Human-Centered AI in Military Cyber Operations. *International Conference on Cyber Warfare and Security*, Vol. 19, P. 121–128. DOI: <https://doi.org/10.34190/iccws.19.1.1972>.
2. Khalifa, E. (2021). Artificial Intelligence and Global Security. *International Affairs Forum (IAF'21)*, P. 1–3. URL: [https://www.researchgate.net/publication/356207786\\_Artificial\\_Intelligence\\_and\\_Global\\_Security](https://www.researchgate.net/publication/356207786_Artificial_Intelligence_and_Global_Security).
3. Agarwala, N. (2023). Robots and Artificial Intelligence in the Military. *Obrana a strategie*, Vol. 23 (2), P. 083–100. DOI: <https://doi.org/10.3849/1802-7199.23.2023.02.083-100>.
4. Bansi, K., Shivam, P. (2023). Collision Between Military Artificial Intelligence and Civilian Artificial Intelligence. *OSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, Vol. 25, Iss. 6, Ser. 1, P. 38–48, DOI: <https://doi.org/10.1010.9790/0661-2506013848>.
5. Ibrahim, A. (2024). Defense Disrupted: AI and ML Transforming Cybersecurity. URL: [https://www.researchgate.net/publication/380152320\\_Defense\\_Disrupted\\_AI\\_and\\_ML\\_Transforming\\_Cybersecurity\\_AUTHORSIBRAHIM\\_A](https://www.researchgate.net/publication/380152320_Defense_Disrupted_AI_and_ML_Transforming_Cybersecurity_AUTHORSIBRAHIM_A).
6. Rashid, A. B., Kausik, A. K., Sunny, A. H., Bappy, M. H. (2023). Artificial Intelligence in the Military: An Overview of the Capabilities, Applications, and Challenges. *International Journal of Intelligent Systems*, Vol. 2023, Article ID 8676366, P. 1–31, DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/8676366>.

7. AI-Powered Cybersecurity: Top Use Cases in 2023. URL: <https://hackernoon.com/ai-powered-cybersecurity-top-use-cases-in-2023>.
8. Trofymenko, O. G., Prokop, Yu. V., Loginova, N. I., Zadereyko, O. V. (2019). Kiberbezpeka Ukrainy: analiz suchasnoho stanu [Cybersecurity of Ukraine: analysis of the current situation]. *Zakhyst informatsii = Ukrainian Information Security Research Journal*, Vol. 21, No. 3, P. 150–157. DOI: <https://doi.org/10.18372/2410-7840.21.13951> [in Ukrainian].
9. Roth, M. Artificial Intelligence in the Military – An Overview of Capabilities. URL: <https://emerj.com/ai-sector-overviews/artificial-intelligence-in-the-military-an-overview-of-capabilities/>
10. AI in Cybersecurity: Transforming Cyber Defense Mechanisms. URL: <https://www.ppln.co/tpost/elo03cn2g1-ai-in-cybersecurity-transforming-cyber-d>.
11. Trofymenko, O. G., Loginova, N. I., Manakov, S. Yu., Dubovoi, Ya. V. (2022). Kiberzahrozy v osvithnomu sektori [Cyberthreats in higher education]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika = Cybersecurity: Education, Science, Technique*, Vol. 4 (16), P. 76–84, DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2022.16.7684>, URL: <https://csecurity.kubg.edu.ua/index.php/journal/article/view/365> [in Ukrainian].
12. Do Xuan, C., Dao, M. H. (2021). A novel approach for APT attack detection based on combined deep learning model. *Neural Comput & Applic*, Vol. 33, P. 13251–13264, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05952-5>.
13. Minuchehr, A. Neural Networks and Security. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/neural-networks-security-ali-minoo/>
14. Soroor, M., Bijan, R. (2024). Financial fraud detection using graph neural networks: A systematic review. *Expert Systems with Applications*, Vol. 240, P. 122–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122156>.
15. Fu, Y., Fu, J., Wei, J. (2023). Encryption and Decryption Using Deep Neural Network. *Machine Learning and Artificial Intelligence*, Vol. 374, P. 9–15, DOI: <https://doi.org/10.3233/FAIA230762>.
16. Google Threat Intelligence. Actionable threat intelligence at Google scale. URL: <https://cloud.google.com/security/products/threat-intelligence/?hl=en>.
- Article ID 8676366. P. 1–31. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/8676366>.
7. AI-Powered Cybersecurity: Top Use Cases in 2023. URL: <https://hackernoon.com/ai-powered-cybersecurity-top-use-cases-in-2023>.
8. Трофименко О. Г., Прокоп Ю. В., Логінова Н. І., Задерейко О. В. Кібербезпека України: аналіз сучасного стану. *Захист інформації*. 2019. Т. 21. № 3. С. 150–157. DOI: <https://doi.org/10.18372/2410-7840.21.13951>.
9. Roth M. Artificial Intelligence in the Military – An Overview of Capabilities. URL: <https://emerj.com/ai-sector-overviews/artificial-intelligence-in-the-military-an-overview-of-capabilities/>
10. AI in Cybersecurity: Transforming Cyber Defense Mechanisms. URL: <https://www.ppln.co/tpost/elo03cn2g1-ai-in-cybersecurity-transforming-cyber-d>.
11. Трофименко О. Г., Логінова Н. І., Манаків С. Ю., Дубової Я. В. Кіберзагрози в освітньому секторі. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2022. № 4 (16). С. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2022.16.7684>. URL: <https://csecurity.kubg.edu.ua/index.php/journal/article/view/365>.
12. Do Xuan C., Dao M. H. A novel approach for APT attack detection based on combined deep learning model. *Neural Comput & Applic*. 2021. Vol. 33. P. 13251–13264. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05952-5>.
13. Minuchehr A. Neural Networks and Security. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/neural-networks-security-ali-minoo/>
14. Soroor M., Bijan R. Financial fraud detection using graph neural networks: A systematic review. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 240. P. 122–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122156>.
15. Fu Y., Fu J., Wei J. Encryption and Decryption Using Deep Neural Network. *Machine Learning and Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 374. P. 9–15. DOI: <https://doi.org/10.3233/FAIA230762>.
16. Google Threat Intelligence. Actionable threat intelligence at Google scale. URL: <https://cloud.google.com/security/products/threat-intelligence/?hl=en>.

17. Trofymenko, O. G., Kikh, Y. T. (2024). Vykorystannia shtuchnoho intelektu u viiskovykh tekhnolohiiakh [Application of artificial intelligence in military technologies]. *Informatsiine suspilstvo: problemy ta perspektyvy: mater. IKh vseukr. nauk.-prakt. konf. = 9th All-Ukrainian scientific and practical conference "Information society: problems and prospects"* (Odesa, May 24, 2024), P. 76–79, DOI: <https://doi.org/10.32837/11300.27842> [in Ukrainian].

18. SIEM / XDR / SOAR Solutions for SOC. URL: <https://nxgsecure.com/siem-xdr-soar-solutions-for-soc/>

19. Trofymenko, O. G., Yaremchuk, M. V. (2023) Shtuchnyi intelekt u viiskovii sferi [Artificial intelligence in the military sphere]. *Kiberprostir v umovakh viiny ta hlobalnykh vyklykiv KhKhI stolittia: teoriia ta praktyka: mater. mizhnar. nauk.-prakt. konf. = International scientific and practical conference "Cyberspace in conditions of war and global challenges of the 21st century: theory and practice"* (Odesa, November 24, 2023), P. 144–148. DOI: <https://doi.org/10.32837/11300.27179> [in Ukrainian].

17. Трофименко О. Г., Кіх Я. Т. Використання штучного інтелекту у військовій технології. *Інформаційне суспільство: проблеми та перспективи: матер. ІХ всеукр. наук.-практ. конф.* (24 травня 2024). Одеса, 2024. С. 76–79. DOI: <https://doi.org/10.32837/11300.27842>.

18. SIEM / XDR / SOAR Solutions for SOC. URL: <https://nxgsecure.com/siem-xdr-soar-solutions-for-soc/>

19. Трофименко О. Г., Яремчук М. В. Штучний інтелект у військовій сфері. *Кіберпростір в умовах війни та глобальних викликів ХХІ століття: теорія та практика: матер. міжнар. наук.-практ. конф.* (Одеса, 24 листопада 2023 р.). Одеса: НУ "ОЮА", 2023. С. 144–148. DOI: <https://doi.org/10.32837/11300.27179>.

**TROFYMENKO OLENA**

PhD, Associate Professor,  
Department of Information Technologies,  
National University "Odesa Law Academy", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-7626-0886>  
Scopus Author ID: 57189319394  
ResearcherID: AAE-5852-2021  
E-mail: [trofymenko@onua.edu.ua](mailto:trofymenko@onua.edu.ua)

**CHYKUNOV PAVLO**

PhD, Associate Professor,  
Department of Information Technologies, National  
University "Odesa Law Academy", Ukraine,  
<https://orcid.org/0000-0003-4959-7744>  
ResearcherID: D-2957-2019  
E-mail: [pavel@onua.edu.ua](mailto:pavel@onua.edu.ua)

**SOKOLOV ARTEM**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Cyber Security,  
National University "Odesa Law Academy", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0283-7229>  
Scopus Author ID: 7402611956  
E-mail: [radiosquid@gmail.com](mailto:radiosquid@gmail.com)

**AKHMAMETIEVA HANNA**

PhD, Associate Professor,  
Department of Cyber Security,  
National University "Odesa Law Academy", Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-0567-902X>  
Scopus Author ID: 57200117944  
E-mail: [anna.odessitka@gmail.com](mailto:anna.odessitka@gmail.com)

**MANAKOV SERHII**

PhD, Associate Professor,  
Department of Information Technologies,  
National University "Odesa Law Academy", Ukraine,  
<https://orcid.org/0000-0001-5930-4592>  
Scopus Author ID: 57224370160  
E-mail: [manakov\\_serhii@onua.edu.ua](mailto:manakov_serhii@onua.edu.ua)

**TROFYMENKO O. G., SOKOLOV A. V., CHYKUNOV P. O.,  
AKHMAMETIEVA H. V., MANAKOV S. Yu.**

*National University "Odesa Law Academy", Ukraine*

**AI IN THE MILITARY CYBER DOMAIN**

**Purpose.** *Analysis of the role of artificial intelligence (AI) in ensuring the cyber security of military networks and the possibility of applying AI in cybersecurity in defense.*

**Methodology.** *The research used methods of analysis of scientific and literary sources, information search, comparison, and generalization.*

**Findings.** *A comparison and analysis of publicly available information on AI-based cybersecurity technologies and tools was performed. As a result of the performed scientific analysis, it was established that AI tools play an important role in detecting and deterring threats of unauthorized intrusions into the security system of the military network. It has been found that AI is now a necessity for every computer system and network. The use of AI technologies in the form of intelligent agents is an effective tool for protecting against cyber attacks and assessing vulnerabilities and risks in cyberspace. During the 24/7 streaming analysis of large volumes of data in real-time, AI can identify patterns and provide recommendations for possible remediation of identified vulnerabilities. AI-powered cyber defense software responds to attacks by isolating affected systems.*

**Originality.** *Areas of possible application of AI in military cyber operations were analyzed and systematized. Technologies of machine and deep learning, and artificial neural networks for identification and prediction of cyber threats are considered.*

**Practical value.** *The obtained results of the performed analysis indicate the powerful potential of using intelligent technologies and tools for the military industry. AI technologies provide cybersecurity teams with flexibility, scalability, and the ability to automate threat detection. The implementation of AI in the cyber security of the military sphere can significantly reduce cyber risks, reduce costs, and optimize the processes of detection, research, response, and monitoring of cyber threats in real time. The paper contributes to the intensification of proactive detection and analysis of potential cyber threats in conjunction with incident and threat response activities in the fight against cybercrime. Ultimately, these advances will help our cyber military to be better prepared and equipped for the challenges and risks of modern warfare.*

**Keywords:** *artificial intelligence (AI); cyber security; risks of cyber threats; military industry; testing; machine learning; deep learning; neural networks.*

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.4.9>

УДК 615.01:  
615.322:  
615.21:661.1

<sup>1</sup>ЛІСОВИЙ В. М., <sup>1,2</sup>БЕССАРАБОВ В. І.

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

<sup>2</sup>Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Київ, Україна

## АНТИОКСИДАНТНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДОЇ ДИСПЕРСНОЇ СИСТЕМИ ГЕСПЕРИДИНУ, ОТРИМАНОЇ МЕТОДОМ ВІДЦЕНТРОВОГО ФОРМУВАННЯ ВОЛОКОН

**Мета.** Розробка та дослідження впливу полімерної твердої дисперсної системи (ТДС) гесперидину на процеси перекисного окиснення білків та ліпідів.

**Методика.** Високорозчинна тверда дисперсна система гесперидину була отримана за допомогою інноваційної технології відцентрового формування волокон з використанням комерційно доступної установки для виробництва цукрової вати. Вплив відцентрово сформованої ТДС гесперидину на процес перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ) було оцінено за методикою визначення кількості продуктів, які реагують з тіобарбітуровою кислотою (ТБК). Цей метод є непрямим та ґрунтується на здатності ТБК взаємодіяти з малоновим діальдегідом (МДА), який є кінцевим продуктом окисної деградації ліпідів та проміжним продуктом етапу ензиматичного окиснення арахідонової кислоти. Дослідження впливу ТДС гесперидину на процес перекисного окиснення білків (ПОБ) здійснювали за визначенням рівня оптичної густини динітрофенілгідразонів, – кінцевих продуктів реакції, які утворилися під час взаємодії окиснених амінокислотних залишків білків з 2,4-динітрофенілгідразином (2,4-ДНФГ).

**Результати.** Розроблено високорозчинну полімерну тверду дисперсну систему гесперидину методом відцентрового формування волокон. Доведено, що використання отриманої ТДС гесперидину призводить до зменшення кількості продуктів перекисного окиснення ліпідів та білків. При цьому з підвищенням концентрації ТДС гесперидину у досліджуваних системах покращується інгібуюча дія, що вказує на концентраційно залежний антиоксидантний ефект.

**Наукова новизна.** Вперше встановлено, що високорозчинна тверда дисперсна система гесперидину, отримана методом відцентрового формування волокон, ефективно дозозалежно інгібує перекисне окиснення білків та ліпідів.

**Практична значимість.** Високорозчинна тверда дисперсна система гесперидину може бути використана у якості активного фармацевтичного інгредієнта (АФІ) для розробки лікарських засобів з антиоксидантними властивостями для лікування та профілактики нейродегенеративних захворювань.

**Ключові слова:** гесперидин; тверда дисперсна система; антиоксиданти; оксидативний стрес; нейродегенеративні захворювання.

**Вступ.** В останні десятиліття у всьому світі спостерігається зростання захворюваності на нейродегенеративні розлади. Найпоширенішими нейродегенеративними захворюваннями вважаються хвороба Альцгеймера (ХА), хвороба Паркінсона (ХП), хвороба Гантінгтона і бічний аміотрофічний склероз (БАС). Патолофізіологія нейродегенеративних захворювань досі ще далека від повного пояснення, однак загальновідомо, що ці патологічні стани характеризуються прогресуючою втратою нейронних клітин, порушенням рухових та/або когнітивних функцій [1, 2].

Сьогодні відомо чимало досліджень, які вказують на те, що значущу роль в патолофізіології нейродегенеративних захворювань відіграє процес оксидативного стресу, який є наслідком нерегульованого утворення активних форм кисню (АФК), які, у свою чергу, пошкоджують важливі біологічні структури: білки, ліпіди, вуглеводи, нуклеїнові кислоти [3–5].

Літературні джерела свідчать, що доступна на даний момент фармакотерапія оксидативного стресу та, відповідно, нейродегенеративних захворювань, виникнення чи

прогресування яких він провокує, передбачає використання антиоксидантів – сполук, які захищають або відновлюють клітинні структури від окисного пошкодження [6].

Відомо, що один із найважливіших та найбільших класів антиоксидантів представляють фенольні сполуки, зокрема біофлавоноїди [7]. Серед великої кількості цього класу сполук одним із відомих представників є гесперидин. Його антиоксидантний потенціал був підтверджений на декількох модельних системах вивчення антиоксидантних властивостей [8]. Однак даний біофлавоноїд має низьку розчинність, що впливає на його біодоступність. Зважаючи на це актуальними є дослідження, що спрямовані на підвищення розчинності гесперидину, що ймовірно, призведе до покращення антиоксидантної активності.

**Постановка завдання.** Літературні дані свідчать про те, що перспективним підходом для покращення розчинності та біодоступності багатьох біофлавоноїдів, а зокрема й гесперидину, є метод утворення твердих дисперсних систем (ТДС) [9]. Також деякі дослідження вказують на те, що за рахунок використання цієї техніки спостерігається не лише значне підвищення розчинності гесперидину у воді, але й вагоме покращення його антиоксидантної активності [9]. Це, відповідно, підтверджує перспективність розробки твердих дисперсних систем гесперидину та перевірки антиоксидантних властивостей отриманих композиційних матеріалів.

Метою роботи є розробка та дослідження впливу полімерної твердої дисперсної системи гесперидину на процеси перекисного окиснення білків та ліпідів.

#### **Матеріал і методи дослідження.**

У ході роботи використовували такі реактиви: сироватка «*Erba Norm*», виготовлена на основі сироватки крові людини з використанням хімічних складників і екстрактів тканин людини і тварин у вигляді ліофілізату (*Erba Lachema*, Чехія); феруму (II) сульфат гептагідрат (Макрохім, Україна); етилендіамінтетраоцтова кислота (ЕДТК) (Merck, Німеччина); калій фосфорнокислий 1-заміщений (Merck, Німеччина); натрію гідроксид дрібногранульований (Merck, Німеччина); пероксид водню (Інтер-Синтез, Україна); 2,4-динітрофенілгідазин (2,4-ДНФГ) (Хімлаборреактив, Україна); трихлороцтова кислота 20% (Хімлаборреактив, Україна); сечовина (Хімлаборреактив, Україна); гесперидин (Chengdu Okay Pharmaceutical Co., LTD, Китай); диметилсульфоксид (ДМСО) (Merck, Німеччина); полівінілпіролідон К-17 (JRS Pharma GmbH & Co.KG, Німеччина); манітол (Merck, Німеччина); 2% розчин ортофосфорної кислоти з рН 1,3 (Chemico Group, Китай); 0,8% розчин тіобарбітурової кислоти (ТБК) (Olaine chemical plant Biolar, Латвія); н-бутанол (Макрохім, Україна); суміш етилового спирту і етилацетату у співвідношенні 1:1; вода дистильована.

Для проведення досліджень використано наступне обладнання: аналітичні ваги AS 60/220 R2 (Radwag, Польща); установка для приготування цукрової вати «Cotton sandy maker» (Китай); лабораторна установка водопідготовки RO-4 (Werner, Німеччина); лабораторна центрифуга CM-8 (Micromed, КНР); пробірки типу Eppendorf об'ємом 2 мл; одноканальні напівавтоматичні дозатори 50, 200, 1000 мкл (Dragon-Lab, Китай); УФ-спектрофотометр OPTIZEN POP (Mecasys, Південна Корея); кювети з кварцового скла з товщиною оптичного шару 1 см; термостат для кювет DV-10С; таймер; лабораторний посуд.

*Приготування твердої дисперсної системи гесперидину.* Для виготовлення твердої дисперсної системи гесперидину застосовували інноваційну технологію відцентрового формування волокон, в основі якої лежить метод спільного плавлення компонентів. Для реалізації даного процесу було використано комерційно доступну установку для виробництва цукрової вати [10].

Спочатку готували фізичну суміш гесперидину, полівінілпіролідону К-17 та манітолу у відсотковому співвідношенні 10:80:10 відповідно. 10 г отриманої фізичної суміші поміщали у фільтру головку установки, яка була попередньо нагріта до необхідної температури (180 °С) та оберталася зі швидкістю близько 2400 об/хв. Одразу після засипання до установки суміш

матеріалів починала плавитися і розплавлена маса за допомогою відцентрової сили розтягувалася і вилітала з отворів обертової головки та осідала на колекторній чаші. Утворена тверда дисперсна система гесперидину мала вигляд волокон, які потім подрібнювали, а отриману порошкоподібну ТДС гесперидину використовували для проведення подальших досліджень.

*Вивчення впливу ТДС гесперидину на процес перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ).* Дослідження рівня перекисного окиснення ліпідів проводилось, базуючись на методі визначення кількості продуктів, які реагують з тіобарбітуровою кислотою (ТБК) [11]. Цей метод є непрямим та ґрунтується на здатності ТБК взаємодіяти з малоновим діальдегідом (МДА), проміжним продуктом етапу ензиматичного окиснення арахідонової кислоти та кінцевим продуктом окисної деградації ліпідів. Принцип метода – визначення інтенсивності забарвлення, яке утворюється в ході реакції між МДА та ТБК, що протікає при високій температурі в кислому середовищі. В результаті реакції утворюється триметиновий комплекс, який має характерний спектр поглинання з максимумом при довжині хвилі 535 нм [11]. У якості зразка порівняння використовували систему, що включала розчин ліофілізованої сироватки крові людини та окиснювальну систему.

*Вивчення впливу ТДС гесперидину на процес перекисного окиснення білків (ПОБ)* проводили за визначенням рівня оптичної густини продукту, який утворився під час реакції взаємодії окиснених амінокислотних залишків білків з 2,4-динітрофенілгідразином (2,4-ДНФГ). Оптичну густину утворених динітрофенілгідразонів реєстрували спектрофотометрично при різних довжинах хвиль 356, 370, 430 і 530 нм [12]. Зразок порівняння був представлений системою, що складалася із розчину ліофілізованої сироватки крові людини та окиснювальної системи на основі феруму сульфату та пероксиду водню.

*Статистичний аналіз.* Результати були виражені як середнє  $\pm$  стандартне відхилення, оцінене у трьох незалежних повторях. Дані були проаналізовані на статистичну значущість за допомогою одностороннього дисперсійного аналізу з пост-факторним тестом Tukey HSD. Достовірними вважали значення  $p \leq 0,05$ .

#### **Результати дослідження.**

*Результати дослідження розчинності гесперидину у складі полімерної твердої дисперсної системи.* Після отримання твердої дисперсної системи гесперидину методом відцентрового формування волокон визначали коефіцієнт підвищення розчинності біофлавоноїда у її складі.

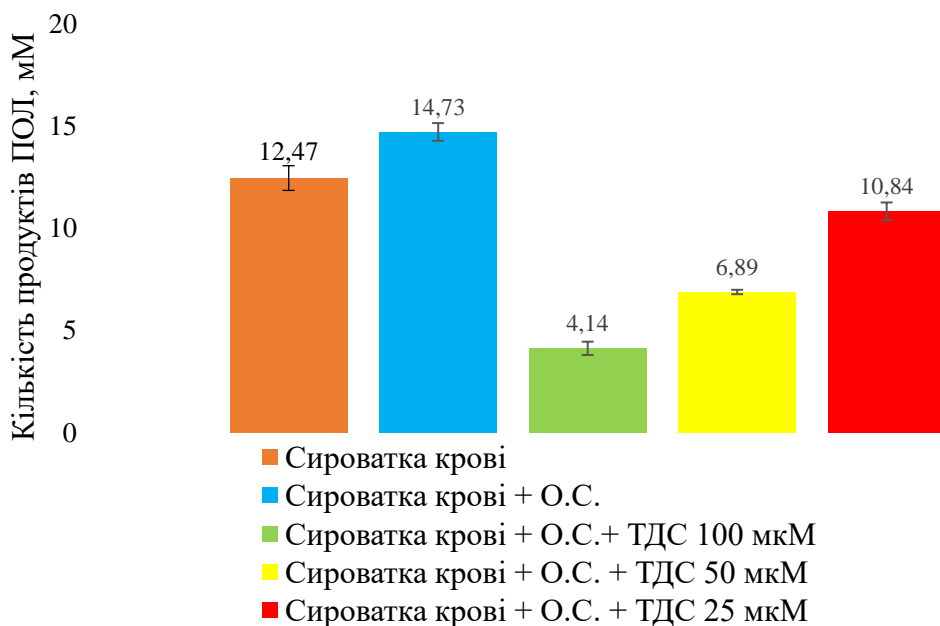
Кількісне визначення гесперидину проводили спектрофотометрично за попередньо побудованим калібрувальним графіком залежності абсорбції від концентрації гесперидину в розчині при довжині хвилі 602 нм ( $R^2=0,998$ ) [13].

Встановлено, що у складі полімерної ТДС розчинність гесперидину вища у 170,7 раза у порівнянні з гесперидином як індивідуальної речовини. Зважаючи на те, що отриманий полімерний композиційний матеріал гесперидину має високу розчинність у воді, то для досліджень з метою перевірки антиоксидантної активності у модельних біологічних системах перекисного окиснення ліпідів та білків отриману ТДС гесперидину розчиняли у воді.

*Результати дослідження впливу ТДС гесперидину на процес перекисного окиснення ліпідів.* У ході досліджень розраховано кількість продуктів перекисного окиснення ліпідів в присутності ймовірного інгібітора процесу, ТДС гесперидину, утвореної методом відцентрового формування волокон. Результати досліджень представлено на рис. 1.

Встановлено, що додавання ТДС гесперидину до біологічної моделі, яка представлена контрольною сироваткою крові людини та окиснювальною системою, зменшує кількість утвореного триметинового комплексу. Відповідно кількість продуктів перекисного окиснення ліпідів достовірно зменшується ( $p \leq 0,05$ ). Кількість продуктів ПОЛ при додаванні ТДС гесперидину в концентрації 100 мкМ зменшується в 3,6 разів; в концентрації 50 мкМ – в

2,1 раза; в концентрації 25 мкМ – в 1,4 раза ( $C_{(0)} = 14,73 \pm 0,43$  мМ;  $C_{(100)} = 4,14 \pm 0,33$  мМ;  $C_{(50)} = 6,89 \pm 0,11$  мМ;  $C_{(25)} = 10,84 \pm 0,43$  мМ відповідно).



**Рис. 1. Залежність кількості продуктів ПОЛ у сироватці крові людини від концентрації ТДС гесперидину (100, 50 та 25 мкМ за гесперидином) в порівнянні з нативною сироваткою крові людини та сироваткою крові з додаванням окиснювальної системи (О.С.)**

Результати дослідження впливу ТДС гесперидину на процес перекисного окиснення білків. При проведенні досліджень було визначено оптичну густину утворених динітрофенілгідрозонів за впливу окиснювальної системи та в присутності в системі ТДС гесперидину в концентраціях 25, 50 і 100 мкМ.

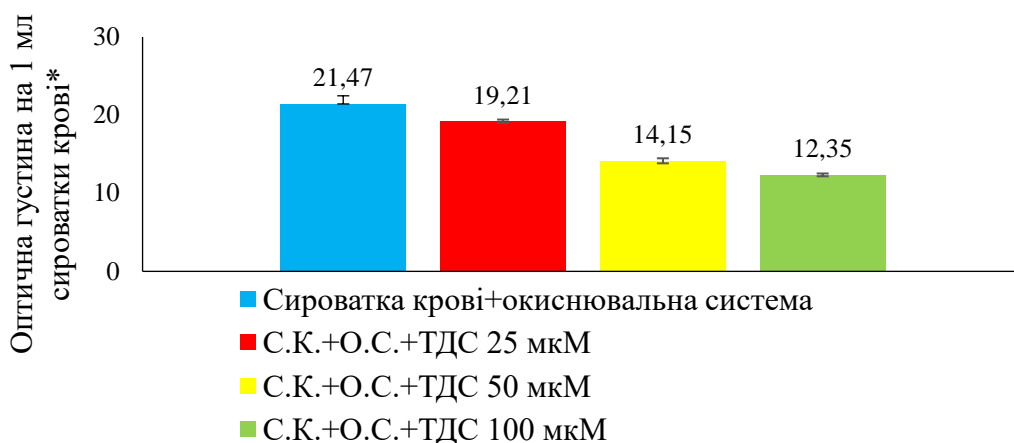
Результати досліджень залежності оптичної густини утворених динітрофенілгідрозонів нейтрального характеру при додаванні у систему ТДС гесперидину у концентраціях 25, 50 та 100 мкМ при довжині хвилі  $\lambda=356$  нм свідчить, що кількість утворених динітрофенілгідрозонів нейтрального характеру зменшується у 1,12; 1,52 та 1,74 раза відповідно ( $p \leq 0,05$ ) (рис. 2).

Показник оптичної густини утворених динітрофенілгідрозонів нейтрального характеру при довжині хвилі  $\lambda=370$  нм також достовірно зменшується (рис. 3).

При додаванні у систему перекисного окиснення білків ТДС гесперидину у концентрації 25 мкМ показник оптичної густини утворених динітрофенілгідрозонів нейтрального характеру зменшується в 1,04 раза, а при використанні ТДС у концентраціях 50 та 100 мкМ він знижується у 1,41 та 1,60 раза відповідно.

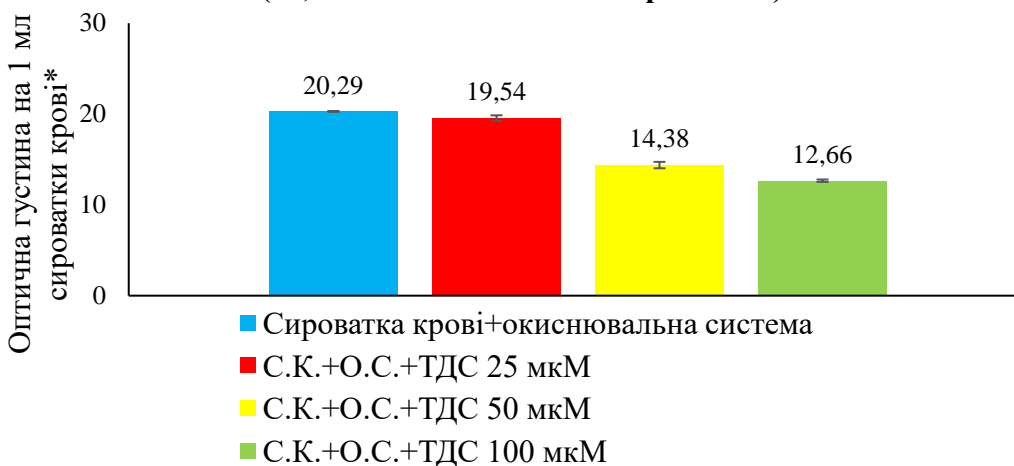
На основі результатів досліджень, наведених на рис. 4, можна стверджувати, що показник оптичної густини утворених динітрофенілгідрозонів основного характеру при довжині хвилі  $\lambda=430$  нм також достовірно зменшується ( $p \leq 0,05$ ). Додавання у систему перекисного окиснення білків ТДС гесперидину у концентрації 25 мкМ зменшує показник оптичної густини утворених динітрофенілгідрозонів у 1,52 раза. Натомість при застосуванні ТДС у концентраціях 50 та 100 мкМ цей показник нижче у 2,02 та 2,24 раза відповідно.

Кількість утворених динітрофенілгідрозонів основного характеру за довжини хвилі  $\lambda=530$  нм при додаванні у систему перекисного окиснення білків ТДС гесперидину у концентраціях 25, 50 та 100 мкМ зменшується відповідно у 3,55; 6,92 та 14,86 раза ( $p \leq 0,05$ ), що підтверджують графічні дані, представлені на рис. 5.



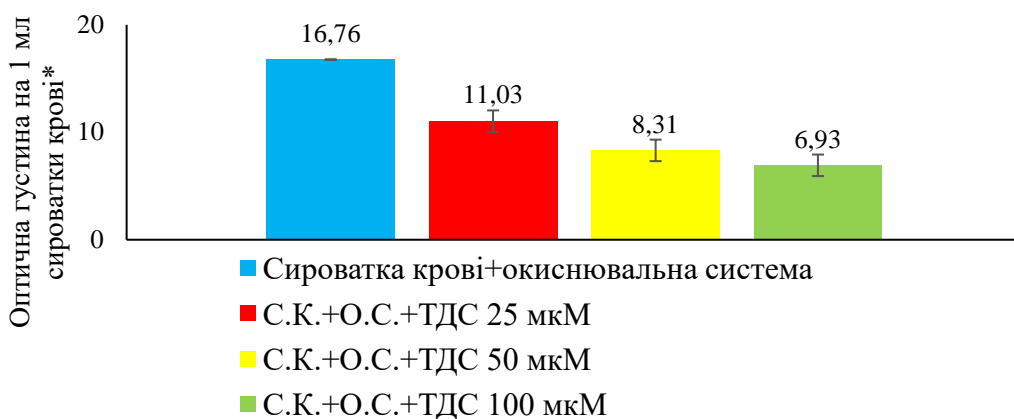
\* перерахунок оптичної густини на 1 мл сироватки крові

Рис. 2. Залежність оптичної густини утворених динітрофенілгідразонів нейтрального характеру при довжині хвилі  $\lambda=356$  нм від концентрації ТДС гесперидину (25, 50 та 100 мкМ за гесперидином)



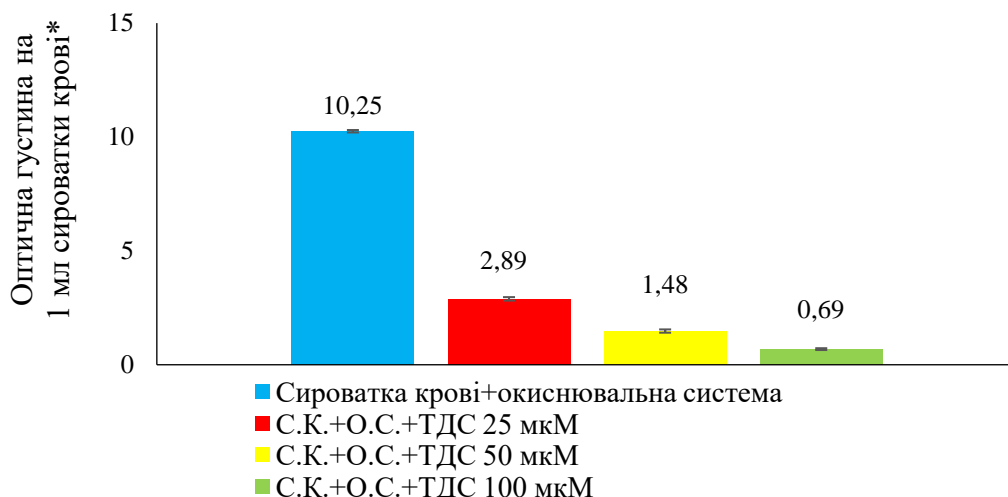
\* перерахунок оптичної густини на 1 мл сироватки крові

Рис. 3. Залежність оптичної густини утворених динітрофенілгідразонів нейтрального характеру при довжині хвилі  $\lambda=370$  нм від концентрації ТДС гесперидину (25, 50 та 100 мкМ за гесперидином)



\* перерахунок оптичної густини на 1 мл сироватки крові

Рис. 4. Залежність оптичної густини утворених динітрофенілгідразонів основного характеру при довжині хвилі  $\lambda=430$  нм від концентрації ТДС гесперидину (25, 50 та 100 мкМ за гесперидином)



\* перерахунок оптичної густини на 1 мл сироватки крові

Рис. 5. Залежність оптичної густини утворених динітрофенілгідразонів основного характеру при довжині хвилі  $\lambda=530$  нм від концентрації ТДС гесперидину (25, 50 та 100 мкМ за гесперидином)

Таким чином встановлено, що тверда дисперсна система гесперидину, отримана методом відцентрового формування волокон, інгібує перекисне окиснення як білків, так і ліпідів. При цьому з підвищенням концентрації ТДС гесперидину у системі збільшується інгібуюча дія на процеси перекисного окиснення, що вказує на дозозалежний антиоксидантний ефект. Предметом майбутніх наукових розвідок повинні стати дослідження впливу ТДС гесперидину, отриманої методом відцентрового формування волокон, на ферментативні системи, які відповідають за розвиток процесів запалення в клітинах.

#### Висновки.

1. Встановлено, що у складі полімерної ТДС, отриманої методом відцентрового формування волокон, розчинність гесперидину вища у 170,7 раза порівняно з розчинністю гесперидину як індивідуальної речовини.

2. Вперше досліджено вплив високорозчинної ТДС гесперидину на перекисне окиснення ліпідів та білків. Доведено, що ТДС гесперидину є ефективним інгібітором процесу деструкції білків та ліпідів. При цьому встановлено, що з підвищенням концентрації ТДС гесперидину у системі підвищується інгібуюча дія на процеси перекисного окиснення ліпідів та білків, що вказує на дозозалежний антиоксидантний ефект.

3. Досліджувана ТДС гесперидину може бути перспективним активним фармацевтичним інгредієнтом для розробки лікарських засобів з антиоксидантними властивостями для лікування та профілактики нейродегенеративних захворювань.

#### References

1. Liguori, I., Russo, G., Curcio, F., Bulli, G., Aran, L., Della-Morte, D., Gargiulo, G., Testa, G., Cacciatore, F., Bonaduce, D., Abete, P. (2018). Oxidative stress, aging, and diseases. *Clinical interventions in aging*, No. 13, P. 757–772. DOI: <https://doi.org/10.2147/CIA.S158513>.

2. Hajam, Y. A., Rani, R., Ganie, S. Y., Sheikh, T. A., Javaid, D., Qadri, S. S., Pramodh, S., Alsulimani, A., Alkhanani, M. F., Harakeh, S., Hussain, A., Haque, S., Reshi, M. S. (2022). Oxidative Stress in Human Pathology and Aging: Molecular Mechanisms and Perspectives. *Cells*,

#### Література

1. Liguori I., Russo G., Curcio F., Bulli G., Aran L., Della-Morte D., Gargiulo G., Testa G., Cacciatore F., Bonaduce D., Abete P. Oxidative stress, aging, and diseases. *Clinical interventions in aging*. 2018. № 13. P. 757–772. DOI: <https://doi.org/10.2147/CIA.S158513>.

2. Hajam Y. A., Rani R., Ganie S. Y., Sheikh T. A., Javaid D., Qadri S. S., Pramodh S., Alsulimani A., Alkhanani M. F., Harakeh S., Hussain A., Haque S., Reshi M. S. Oxidative Stress in Human Pathology and Aging:

- No. 11 (3), 552. DOI: <https://doi.org/10.3390/cells11030552>.
3. Vardar Acar, N., Özgül, R. K. (2023). The bridge between cell survival and cell death: reactive oxygen species-mediated cellular stress. *EXCLI journal*, No. 22, P. 520–555. DOI: <https://doi.org/10.17179/excli2023-6221>.
4. Kumar, S., Abhay Pandey (2015). Free radicals: health implications and their mitigation by herbals. *British Journal of Medicine and Medical Research*, No. 6, P. 438–457.
5. Pizzino, G., Irrera, N., Cucinotta, M., Pallio, G., Mannino, F., Arcoraci, V., Squadrito, F., Altavilla, D., Bitto, A. (2017). Oxidative Stress: Harms and Benefits for Human Health. *Oxidative medicine and cellular longevity*, No. 2017, 8416763. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8416763>.
6. Forman, H. J., Zhang, H. (2021). Targeting oxidative stress in disease: promise and limitations of antioxidant therapy. *Nature reviews. Drug discovery*, No. 20 (9), P. 689–709. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41573-021-00233-1>.
7. Liu, K., Luo, M., Wei, S. (2019). The Bioprotective Effects of Polyphenols on Metabolic Syndrome against Oxidative Stress: Evidences and Perspectives. *Oxidative medicine and cellular longevity*, No. 2019, 6713194. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/6713194>.
8. Khan, A., Ikram, M., Hahm, J. R., Kim, M. O. (2020). Antioxidant and Anti-Inflammatory Effects of Citrus Flavonoid Hesperetin: Special Focus on Neurological Disorders. *Antioxidants* (Basel, Switzerland), No. 9 (7), 609. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox9070609>.
9. Budiman, A., Rusdin, A., Aulifa, D. L. (2023). Current Techniques of Water Solubility Improvement for Antioxidant Compounds and Their Correlation with Its Activity: Molecular Pharmaceutics. *Antioxidants* (Basel, Switzerland), No. 12 (2), 378. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12020378>.
10. Lisovyi, V., Kharchenko, A., Goy, A., Plavan, V., Bessarabov, V. (2023). Determination of increase in the degree of hesperidin dissolution in the composition of a centrifugally formed solid dispersion system. *Open Readings 2023: 66th international conference for students of Physics and Natural sciences*. P. 396.
11. Kumar, S., Chaitanya, R. K., Preedy, V. R. (2018). Assessment of antioxidant potential of dietary components. In: *HIV/AIDS* (pp. 239–253). Academic Press.
- Molecular Mechanisms and Perspectives. *Cells*. 2022. № 11 (3). P. 552. DOI: <https://doi.org/10.3390/cells11030552>.
3. Vardar Acar N., Özgül, R. K. The bridge between cell survival and cell death: reactive oxygen species-mediated cellular stress. *EXCLI journal*. 2023. № 22. P. 520–555. DOI: <https://doi.org/10.17179/excli2023-6221>.
4. Kumar S., Abhay Pandey. Free radicals: health implications and their mitigation by herbals. *British Journal of Medicine and Medical Research*. 2015. № 6. P. 438–457.
5. Pizzino G., Irrera N., Cucinotta M., Pallio G., Mannino F., Arcoraci V., Squadrito F., Altavilla, D., Bitto A. Oxidative Stress: Harms and Benefits for Human Health. *Oxidative medicine and cellular longevity*. 2017. № 2017. 8416763. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8416763>.
6. Forman H. J., Zhang H. Targeting oxidative stress in disease: promise and limitations of antioxidant therapy. *Nature reviews. Drug discovery*. 2021. № 20 (9). P. 689–709. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41573-021-00233-1>.
7. Liu K., Luo M., Wei S. The Bioprotective Effects of Polyphenols on Metabolic Syndrome against Oxidative Stress: Evidences and Perspectives. *Oxidative medicine and cellular longevity*. 2019. № 2019. 6713194. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/6713194>.
8. Khan A., Ikram M., Hahm J. R., Kim M. O. Antioxidant and Anti-Inflammatory Effects of Citrus Flavonoid Hesperetin: Special Focus on Neurological Disorders. *Antioxidants* (Basel, Switzerland). 2020. № 9 (7). 609. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox9070609>.
9. Budiman A., Rusdin A., Aulifa D. L. Current Techniques of Water Solubility Improvement for Antioxidant Compounds and Their Correlation with Its Activity: Molecular Pharmaceutics. *Antioxidants* (Basel, Switzerland). 2023. № 12 (2). 378. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox12020378>.
10. Lisovyi V., Kharchenko A., Goy A., Plavan V., Bessarabov V. Determination of increase in the degree of hesperidin dissolution in the composition of a centrifugally formed solid dispersion system. *Open Readings 2023: 66th international conference for students of Physics and Natural sciences*. 2023. P. 396.
11. Kumar S., Chaitanya R. K., Preedy V. R. Assessment of antioxidant potential of dietary components. In: *HIV/AIDS*. Academic Press. 2018. P. 239–253.

12. Zakaria, S. A., Talal, Z., Othman, N. S. (2022). Using 2, 4-dinitrophenylhydrazine in spectrophotometric determination. *Samarra Journal of pure and Applied Science*, No. 4 (2), P. 107–117.

13. Lisovyi, V. M., Bessarabov, V. I., Goy, A. M., Kostyuk, V. H. (2024). Spektrofotometrychna metodyka vyznachennia kilkisnoho vmistu hesperydynu u skladi polimernoho kompozytsiinoho materialu, otrymanoho metodom vidtsentrovoho formuvannia volokon [Spectrophotometric method for determining the quantitative content of hesperidin in the polymer composite material obtained by the method of centrifugal fiber formation]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, No. 335 (3 (1)), P. 135–141. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-335-3-19> [in Ukrainian].

12. Zakaria S. A., Talal Z., Othman N. S. Using 2, 4-dinitrophenylhydrazine in spectrophotometric determination. *Samarra Journal of pure and Applied Science*. 2022. № 4 (2). P. 107–117.

13. Лісовий В. М., Бессарабов В. І., Гой А. М., Костюк В. Г. Спектрофотометрична методика визначення кількісного вмісту гесперидину у складі полімерного композиційного матеріалу, отриманого методом відцентрового формування волокон. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. № 335 (3 (1)). P. 135–141. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-335-3-19>.

**LISOVYI VADYM**

Postgraduate, Department of Chemical Technologies and Resource Saving; Assistant, Department of Industrial Pharmacy Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine; <https://orcid.org/0000-0002-8038-0650>  
Scopus Author ID: 57953524800  
Researcher ID: A-7184-2019  
E-mail: [lisovyi.vm@knuud.edu.ua](mailto:lisovyi.vm@knuud.edu.ua)

**BESSARABOV VOLODYMYR**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Industrial Pharmacy, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine; L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine <https://orcid.org/0000-0003-0637-1729>  
Scopus Author ID: 36917184700  
Researcher ID: D-3425-2017  
E-mail: [v.bessarabov@kyivpharma.eu](mailto:v.bessarabov@kyivpharma.eu)

**<sup>1</sup>LISOVYI V. M., <sup>1,2</sup>BESSARABOV V. I.**

<sup>1</sup>Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine  
<sup>2</sup>L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**ANTIOXIDANT PROPERTIES OF SOLID DISPERSED SYSTEM OF HESPERIDIN OBTAINED BY CENTRIFUGAL FIBER FORMATION**

**Purpose.** Development and study of the effect of polymeric solid dispersed system (SDS) of hesperidin on the processes of protein and lipid peroxidation.

**Methodology.** A highly soluble solid dispersed system of hesperidin was obtained by means of an innovative technology of centrifugal fiber formation using a commercially available cotton candy machine. The effect of centrifugally formed SDS of hesperidin on lipid peroxidation (LPO) was evaluated by the method of determining the amount of products that react with thiobarbituric acid (TBA). This method is indirect and is based on the ability of TBA to interact with malondialdehyde (MDA), which is the end product of oxidative lipid degradation and an intermediate product of the enzymatic oxidation of peanut donic acid. The study of the effect of hesperidin SDS on the process of protein peroxidation (PPO) was carried out by determining the level of optical density of dinitrophenylhydrazones, the final reaction products formed during the interaction of oxidized amino acid residues of proteins with 2,4-dinitrophenylhydrazine (2,4-DNPH).

**Findings.** A highly soluble polymeric solid dispersed system of hesperidin was developed by the method of centrifugal fiber formation. It has been proved that the use of the obtained SDS of hesperidin leads to a decrease in the amount of lipid and protein peroxidation products. At the same time, the inhibitory effect in the studied systems improves with increasing concentration of SDS of hesperidin, indicating a concentration-dependent antioxidant effect.

**Originality.** For the first time, it was established that the highly soluble solid dispersed system of hesperidin, obtained by the method of centrifugal fiber formation, effectively inhibits the process of peroxidation of proteins and lipids in a dose-dependent manner.

**Practical value.** The highly soluble solid dispersed system of hesperidin can be used as an active pharmaceutical ingredient (API) for the development of drugs with antioxidant properties for the treatment and prevention of neurodegenerative diseases.

**Keywords:** hesperidin; solid dispersed system; antioxidants; oxidative stress; neurodegenerative diseases.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.4.10>

УДК 677.494

<sup>1</sup>ПЛАВАН В. П., <sup>1</sup>КОЛОДІЙ А. І., <sup>1</sup>ОХМАТ О. А.,  
<sup>2</sup>БОЙЧЕНКО А. Ю., <sup>1</sup>ЛАТИШЕВ Д. О.

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій і дизайну, Україна

<sup>2</sup>Товариство з обмеженою відповідальністю «АГРОТЕХШКІРА», Україна

## ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ПОЛІМЕРНИХ ДИСПЕРСІЙ ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛІЗАЦІЇ ПОВЕРХНІ ВОЛОКНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета.** Аналіз властивостей полімерних дисперсій різного хімічного складу для визначення можливості їх подальшого застосування у складі полімерних покриттів для функціоналізації волокнистих матеріалів.

**Методика.** В роботі використали полімерні матеріали різних типів: Plextol UltraFine PR 3500K (Synthomer, Germany), Vinavil Eva 1612 (Vinavil, Italy), Crilat 4815 (Vinavil, Italy), Impranil DLP-R (Covestro, Germany). Якість водоемульсійних плівкоутворювальних систем і можливості їх використання в процесі функціоналізації поверхні волокнистих основ визначали за вмістом сухого залишку та в'язкістю, рН, плівкоутворювальною здатністю та стійкістю до дії електролітів.

**Результати.** Зроблено порівняльну оцінку водно-дисперсійних акрилових, вінілових і уретанових полімерів з метою визначення можливості їх подальшого застосування для функціоналізації поверхні волокнистих основ. Визначили, що всі полімерні дисперсії проявляють стійкість до дії гідроксиду амонію. Також всі полімерні дисперсії (за винятком водної дисперсії акрилового співполімеру Plextol UltraFine PR 3500K) проявляють стійкість до дії хлориду натрію, сульфату амонію та ацетатної кислоти. Враховуючи близьке значення рН, практично всі полімерні дисперсії можуть змішуватись без загрози коагуляції. В подальшому представляє інтерес визначення можливості комбінації полімерних дисперсій Crilat 4815 та Impranil DLP-R при створенні гібридного акрил-уретанового покриття для волокнистих основ, з огляду на подібну стійкість цих дисперсій до дії електролітів.

**Наукова новизна.** Дрібнодисперсні емульсії плівкоутворювальних акрил-уретанових полімерів нового покоління здатні модифікувати поверхню текстильного матеріалу через взаємодію з його функціональними групами, що дає змогу створювати конкурентоспроможні тканини з покращеними стабільними властивостями, зокрема технічного застосування.

**Практична значимість.** Запропоновано нові види водно-дисперсійних систем на акрилових і уретанових полімерах для модифікування поверхні тканин з метою надання тканинам нових функціональних властивостей. Очікується, що у цих гібридних дисперсіях акриловий компонент забезпечуватиме стійкість до дії лугів і зовнішніх впливів, тоді як поліуретан підвищуватиме міцність, гнучкість та однорідність утвореної плівки.

**Ключові слова:** полімерні дисперсії; полімерні покриття; акрил-уретанові полімери; модифікація поверхні; функціональні властивості.

**Вступ.** У виробництві шкіряних, текстильних, нетканих матеріалів і виробів з них активно впроваджуються інноваційні розробки, які дозволяють розширити діапазон функціональних властивостей цих матеріалів [1]. На основі методів фізико-хімічної модифікації поверхні полімерами розробляються спеціальні види текстильних матеріалів з оптимізованими характеристиками. Приклади включають текстурування, тиснення, фарбування, захист від води та вітру, стійкість до стирання, об'єм, проникність для водяної пари та газів, хімічну стійкість. В одязі та синтетичній шкірі комфорт при носінні є основною метою, але в технічному текстилі іноді саме покриття створює цільову функцію. Це стосується, наприклад, конвеєрних стрічок чи туристичних наметів [2]. Волокна, нитки, тканини та неткані матеріали, модифіковані полімерами в різний спосіб, використовуються для інженерних застосувань, наприклад, для армування гумових виробів, у виробництві

сорбційних матеріалів [3]. Крім того, користуються попитом захисні, водо-, масло-, ґрунтовідштовхувальні покриття, світловідбиваючі тканини.

Полімери все частіше використовують у пігментному фарбуванні текстильних матеріалів як сполучні речовини [4, 5]. Виступаючи як допоміжні речовини, полімери застосовуються як модифікатори поверхні текстильних матеріалів [6]. Попередня обробка тканини полімерами дозволяє закріплювати пігменти або мінеральні наповнювачі на текстильних матеріалах. Модифікація поверхні текстильних матеріалів за допомогою полімерів стає все більш популярною як метод функціональної обробки. Однак, всі ці методи модифікації мають низку недоліків: системи на основі розчинників вибухонебезпечні, легкозаймисті або мають небажані побічні ефекти. Полімерні системи на водній основі споживають значну кількість енергії для випаровування вологи та утворення полімерної плівки.

Останнім часом на світовому ринку з'явилися дрібнодисперсні емульсії плівкоутворювальних акрилових полімерів нового покоління, здатні не тільки модифікувати поверхню текстильного матеріалу, але й глибоко проникати в волокно та взаємодіяти з його функціональними групами, що дає змогу створювати конкурентоспроможні тканини з покращеними стабільними властивостями. Особливо важливим напрямом у розвитку технологій отримання тканин з функціональними властивостями є розробка технологій виробництва текстильних матеріалів із властивостями, які повністю задовольняють вимоги військових і правоохоронних органів [7]. Поява нового покоління полімерів (співполімери акрилової та уретанової природи, гібридні полімерні препарати) дозволяє створювати різноманітні спецефекти на текстильних матеріалах, зокрема, екрануючий ефект для захисту від електромагнітного випромінювання. Попит на згадані текстильні матеріали зростає в умовах воєнного стану в Україні.

Вибір полімеру залежить від хімічного складу тканини, що обробляється, і від вимог до кінцевого результату. Змінивши рецептуру і технологічні режими підготовки текстильних матеріалів до покриття, можна досягти необхідного ступеня дифузії та глибини проникнення пігментів або мінеральних наповнювачів у матеріал, а також підвищити механічну міцність покриття, його стійкість до світла, вологи, перепадів температури та інших зовнішніх впливів.

Запропоновано нові види водно-дисперсійних систем на акрилових і уретанових полімерах для модифікування поверхні тканин на етапах обробки з метою надання тканинам певних функціональних властивостей. У цих гібридних дисперсіях акриловий компонент забезпечує стійкість до дії лугів і зовнішніх впливів, а також хорошу сумісність з пігментами та низьку вартість, тоді як поліуретан підвищує міцність, гнучкість і продуктивність утворення плівки [8].

З міркувань продуктивності полімерні покриття на текстильних матеріалах формуються нагріванням; час контакту в сушарках становить кілька хвилин із максимальною температурою 160–200 °С. Нормальною процедурою є нанесення їх як однокомпонентних систем за допомогою ракульного ножа для нанесення покриття. На додаток до поліакрилатів, які є матеріалом вибору для домашнього текстилю, дисперсії поліуретанів зазвичай використовуються як водні зв'язувальні речовини, коли вимагається широкий діапазон властивостей, таких як високий комфорт при носінні та хороша гнучкість при низьких температурах [9]. Оскільки шкіра є натуральним матеріалом, її можна сушити лише при температурі до 80 °С. При температурі вище 90 °С шкіра втрачає значну частину вологи, стає менш еластичною, відбувається її усадка. З цієї причини полімерні покриття на водній основі значною мірою замінили покриття на основі розчинників. Акрилатні дисперсії використовуються в основному у заключній обробці недорогих виробів, тоді як поліуретанові покриття є найсучаснішими для забезпечення оптимального результату по механічних характеристиках плівкових покриттів, комфорту та стійкості до стирання та забруднення, наприклад, у салонах автомобілів чи меблях.

Для нанесення покриттів на поверхню шкіри використовуються різні технології, зокрема для нанесення покриттів на поверхню спилка використовують метод перенесення плівки. На текстильну основу дисперсії наносяться у вигляді компактної плівки або механічної піни безпосередньо, або також шляхом процесу перенесення. Пористі покриття додають об'єму одягу, але зберігають його низьку вагу. Їх також можна використовувати для ізоляційних матеріалів або як мембрани. Зазвичай вони наносяться трьома шарами: ґрунтовка для зчеплення з основою, проміжне покриття для додання об'єму та функції та верхнє покриття для надання стійкості до механічного впливу, забезпечення гарного зовнішнього вигляду та приємного грифу. Для обробки текстилю дисперсії поліуретанів наносяться у настільки малих кількостях, що зовнішній вигляд текстильної основи залишається незмінним.

**Постановка завдання.** Метою даної наукової роботи є розробка технології обробки волокнистих матеріалів на основі використання водно-дисперсійних акрилових, вінілових і уретанових полімерів для надання волокнистим матеріалам певних функціональних властивостей. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати властивості різних полімерних матеріалів для визначення можливості їх подальшого застосування у складі полімерних композицій для функціоналізації волокнистих матеріалів.

**Методологія дослідження.** В роботі використали полімерні матеріали різних типів: Plextol UltraFine PR 3500K (Synthomer, Germany), Vinavil Eva 1612 (Vinavil, Italy), Crilat 4815 (Vinavil, Italy), Impranil DLP-R (Covestro, Germany). Вибір матеріалів обумовлений простотою їх застосування, доступністю на ринку, прийнятною ціною.

Водна дисперсія акрилового співполімеру з наддрібним розміром частинок Plextol UltraFine PR 3500K розроблена для використання в ґрунтовках для пористих основ. Завдяки низькій температурі плівкоутворення та хорошій адгезії заґрунтовані поверхні виходять гладкими та щільними для остаточного декоративного покриття.

Водна дисперсія співполімеру вінілацетату та етилену Vinavil Eva 1612 не містить розчинників, з дуже низьким вмістом алкілфенол етоксилату (APEO-FREE).

Чиста акрилова дисперсія на водній основі Crilat 4815 характеризується дуже малим розміром частинок. Завдяки цій особливості визначається як нанолатекс. Crilat 4815 не містить алкілфенол-етоксилатів (APEO-FREE), формальдегіду та розчинників, не має запаху. Crilat 4815 – це надтонка дисперсія, яка після нанесення на поверхню проникає в глибину і діє як регулятор просочування та прискорювач адгезії верхнього покриття.

Аніонна аліфатична поліефірно-поліуретанова дисперсія Impranil-DLP-R підходить для створення текстильних покриттів для таких застосувань, як верхній одяг, сумки/багаж, технічні вироби. Має дуже хорошу стійкість до гідролізу та світлостійкість. Забезпечує хорошу адгезію, високий вміст твердих речовин і хорошу стабільність при перемішуванні.

Якість водоемульсійних плівкоутворювальних систем і можливості їх використання в процесі функціоналізації поверхні волокнистих матеріалів визначаються наступними їх властивостями: плівкоутворювальною здатністю, стійкістю до дії електролітів, реологічними характеристиками (в'язкість, тиксотропія), вмістом сухого залишку та ін. [10].

**Визначення рН дисперсії полімерів.** Змішування дисперсій полімерів із значеннями рН, що різко відрізняються один від одного, небажано. Суміщене використання дисперсій полімерів, наприклад, з рН=3 та рН=9 може викликати повну або часткову їх коагуляцію. Не можна змішувати аніоноактивні латекси з катіоноактивними.

Дослідну дисперсію полімерів розводять дистильованою водою до вмісту 8% сухих речовин. Визначення рН проводять потенціометричним способом за допомогою скляного електроду. Очищення скляного електроду від плівки, що утворюється при дослідженні, необхідно проводити 10%-вим розчином карбонату натрію з наступним ретельним промиванням електроду дистильованою водою.

*Визначення сухого залишку полімерної дисперсії.* Наважку полімерної дисперсії, зважену на аналітичних вагах, вміщують у доведений до постійної маси бюкс. Маса наважки полімерної дисперсії для дослідження складає 3–5 г. Бюкс з відкритою кришкою сушать у сушильній шафі при температурі  $105 \pm 5$  °C до постійної маси. Вміст сухого залишку  $C3$ , %, розраховують за формулою:

$$C3 = \frac{(a - a_1)}{H} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $a$  – маса бюксу з дисперсією після висушування, г;  
 $a_1$  – маса порожнього бюксу, г;  
 $H$  – наважка дисперсії, г.

*Визначення загущення латексу при дії гідроксиду амонію.* Загущення полімерної дисперсії при дії гідроксиду амонію визначають з метою прогнозування поведінки плівкоутворювального матеріалу у покривних фарбах, значення рН яких вище 7. Крім того, стійкість до загущення аміаком визначає чистоту (дисперсність) та колоїдно-хімічні властивості плівкоутворювального матеріалу, які забезпечують найбільш сприятливі умови його застосування.

Для визначення цього показника технічну дисперсію розводять дистильованою водою до 13%-го вмісту сухих речовин. Далі готують 5 пробірок, в кожену з яких наливають по 15 мл 13%-ої дисперсії та, починаючи з другої пробірки, додають по 0,2 мл дистильованої води та 6,25, 12,5, 18,75% розчину аміаку. Після нетривалого перемішування проби витримують протягом 10 хв., визначають в'язкість при температурі 25 °C.

У виробництві водоемульсійних лакофарбових матеріалів використовуються дисперсії ліофобного типу, в яких полімери (дисперсна фаза) практично не розчиняються у воді і помітно не набухають. Такі дисперсії нестійкі і швидко розшаровуються. Стабілізацію водних емульсій полімерів здійснюють шляхом введення в систему поверхнево-активних речовин (ПАР) іоногенного і неіоногенного типу [11]. Емульсії, стабілізовані іоногенними ПАР, втрачають агрегатну стійкість при додаванні деяких електролітів і неелектролітів, які змішуються з водою (спирти, ацетон тощо). При стабілізації емульсій неіоногенними ПАР електроліти не виявляють коагулюючої дії.

До складу водоемульсійних покриттів, крім плівкоутворювальних речовин, входять також пігменти, наповнювачі, вода і допоміжні функціональні речовини – диспергатори, емульгатори, стабілізатори, загущувачі, піногасники, антисептики, інгібітори корозії, а також різного роду добавки – гідрофобізуючі, структуруючі тощо.

Із неорганічних пігментів у виробництві водоемульсійних покриттів знаходять застосування пігментні концентрати на основі сполук титану, хрому, заліза, цинку, свинцю та інших мінералів. Деякі з них володіють слабо лужними властивостями і тому не суміщаються з водними полімерними дисперсіями [12]. Із органічних пігментів застосовують азо- і фталоціанінові пігменти. Із наповнювачів застосовують в основному тальк, крейду, каолін [13]. Додавання цих речовин також може викликати передчасну коагуляцію полімерних дисперсій. Тому дослідження стійкості полімерних дисперсій до дії електролітів і порогу коагуляції набуває першочергового значення для визначення можливості змішування полімерних дисперсій.

*Визначення стійкості полімерних матеріалів до дії електролітів.* Для визначення стійкості до дії електролітів досліджувану полімерну дисперсію розводять дистильованою водою до 8%-го вмісту сухих речовин. У сім пробірок наливають по 10 мл приготовленого 8%-го розчину полімерної дисперсії і додають необхідний об'єм розчину електроліту. Як електроліти використовують 1н розчини хлориду кальцію, гідроксиду амонію, хлориду натрію, сульфату амонію, сульфату алюмінію, ацетатної та хлоридної кислот.

В окрему пробірку із бюретки додають по 0,5 мл електроліту і поступово доводять його об'єм до 10 мл. Після кожного додавання електроліту пробірку струшують і залишають на 8...10 хв. Далі відмічають зміни, які сталися з вмістом кожної пробірки (зміна густини, поява розшарування, коагуляція тощо). При відсутності помітних змін додають чергові порції електроліту у пробірку. За відсутності змін у пробірці дослід припиняють, коли загальний об'єм електроліту, доданого у пробірку, складає 10 мл. При виявленні певних змін визначають рН суміші та об'єм електроліту, при якому ці зміни сталися.

Коефіцієнт електролітичної стійкості  $K_{e.c.}$  розраховують за об'ємом  $V_e$  розчину електроліту, достатнім для коагуляції 1 г сухої речовини досліджуваної полімерної дисперсії, за формулою:

$$K_{e.c.} = V_e / m, \quad (2)$$

де  $V_e$  – об'єм електроліту, мл;

$m$  – маса полімерної дисперсії, яка розраховується за формулою (3), г;

$$m = \frac{C \cdot V_{п.д.}}{100} = \frac{8 \cdot 10}{100} = 0,8 \text{ г}, \quad (3)$$

де  $C$  – концентрація дисперсії (8%),

$V_{п.д.}$  – об'єм полімерної дисперсії (10 мл). В даному дослідженні маса полімерної дисперсії дорівнює 0,8 г.

Поріг коагуляції (г/л) визначає критичну концентрацію електроліту, що викликає коагуляцію полімерної дисперсії і розраховується за формулою:

$$П. к. = \frac{N \cdot E \cdot V_e}{V_{п.д.}}, \quad (4)$$

де  $N$  – нормальність електролітів;

$E$  – еквівалентна маса електроліту (грам-еквівалент речовини), г;

$V_e$  – об'єм електроліту, мл;

$V_{п.д.}$  – об'єм полімерної дисперсії (10 мл).

**Результати дослідження та їх обговорення.** Фізико-хімічні властивості полімерних матеріалів представлені в табл. 1. Як видно з наведених даних, всі полімерні дисперсії відзначалися хорошим плівкоутворенням, хоча Vinavil Eva 1612 утворює нерівномірну по товщині плівку через погане розтікання по поверхні, а Stilat 4815, на відміну від інших дисперсій, утворює ламку плівку.

Всі полімерні дисперсії відрізнялись стійкістю до загушення при дії гідроксиду амонію незалежно від його концентрації. Крім того, всі полімерні дисперсії практично не змочували поверхню натуральної шкіри, хоча добре змочували поверхню текстильного матеріалу, за винятком Vinavil Eva 1612.

Як видно із наведених у табл. 2 даних, всі полімерні дисперсії проявляють стійкість до дії гідроксиду амонію. Також всі полімерні дисперсії (за винятком водної дисперсії акрилового співполімеру Plextol UltraFine PR 3500K) проявляють стійкість до дії хлориду натрію, сульфату амонію і ацетатної кислоти. Vinavil Eva 1612 проявляє стійкість до дії всіх електролітів. Враховуючи близьке значення рН, практично всі полімерні дисперсії можуть змішуватись без загрози коагуляції. Крім того, деякі неорганічні пігменти і наповнювачі, які володіють слабко лужними властивостями [12, 13], також можуть бути включені до складу полімерних композицій.

Таблиця 1

**Фізико-хімічні властивості полімерних матеріалів для функціоналізації  
 поверхні волокнистих основ**

Показник	Полімерний матеріал			
	Plextol UltraFine PR 3500K	Vinavil Eva 1612	Crilat 4815	Impranil DLP-R
Зовнішній вигляд	Напівпрозорий	Білий	Напівпрозорий	Білий
Запах	Слабкий хімічний			
Питома вага, г/см <sup>3</sup>	1,041	1,077	1,070	1,106
pH	4,7	4,4	4,9	4,7
Сухий залишок, %	29,1	52,4	31,4	49,5
Відносна в'язкість полімерної дисперсії	1,68	1,95	1,65	1,27

Таблиця 2

**Стійкість полімерних матеріалів до дії електролітів**

Полімерний матеріал	Електроліт						
	хлорид кальцію	гідроксид амонію	хлорид натрію	сульфат амонію	сульфат алюмінію	ацетатна кислота	хлоридна кислота
Коефіцієнт електролітичної стійкості, мл/г							
Plextol UltraFine PR 3500K	0,63	стійкий	5,63	5,63	0,63	5,63	0,63
Vinavil Eva 1612	стійкий						
Crilat 4815	3,75	стійкий			1,88	стійкий	1,25
Impranil DLP-R	1,25	стійкий			1,28	стійкий	0,63
Поріг коагуляції (кількість електроліту, г/л)							
Plextol UltraFine PR 3500K	2,77	відсутній			8,55	відсутній	1,82
Vinavil Eva 1612	відсутній						
Crilat 4815	16,65	відсутній			25,66	відсутній	3,65
Impranil DLP-R	5,55	відсутній			17,11	відсутній	1,82

Оскільки мета дослідження полягає у створенні гібридного акрил-уретанового покриття для волокнистих основ, представляє інтерес в подальшому визначення можливості комбінації полімерних дисперсій Crilat 4815 і Impranil DLP-R з огляду на їх подібну стійкість до дії електролітів. Тим більше, що іншими авторами [14] також підтверджується поліпшення хімічних і механічних властивостей утворених гібридних акрилат-уретанових систем.

**Висновки.** Зроблено порівняльну оцінку водно-дисперсійних акрилових, вінілових і уретанових полімерів з метою визначення можливості їх подальшого застосування для функціоналізації поверхні волокнистих основ. Визначили, що всі полімерні дисперсії проявляють стійкість до дії гідроксиду амонію. Також всі полімерні дисперсії (за винятком водної дисперсії акрилового співполімеру Plextol UltraFine PR 3500K) проявляють стійкість до дії хлориду натрію, сульфату амонію і ацетатної кислоти. Враховуючи близьке значення pH, практично всі полімерні дисперсії можуть змішуватись без загрози коагуляції. З огляду на подібну стійкість до дії електролітів полімерних дисперсій Crilat 4815 і Impranil DLP-R, в подальшому представляє інтерес визначення можливості їх комбінації при створенні гібридного акрил-уретанового покриття для волокнистих основ. Очікується, що у цих гібридних дисперсіях акриловий компонент забезпечуватиме стійкість до дії лугів і зовнішніх впливів, тоді як поліуретан підвищуватиме міцність, гнучкість та однорідність утвореної плівки.

## References

1. Petrova, L., Grishin, R., Zimnurov, A., Kozlova, O., Odintsova, O., Sangeeva, E. (2023). Improvement of Textile Materials Processing Techniques by Applying Aqueous Dispersions of Polymers. *Coatings*, 13(2), 462. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13020462>.
2. Engels, H.-W., Pirkl, H.-G., Albers, R., Albach, R. W., Krause, J., Hoffmann, A., ... Dormish, J. (2013). Polyurethanes: Versatile Materials and Sustainable Problem Solvers for Today's Challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, No. 52 (36), P. 9422–9441. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201302766>.
3. Plavan, V. P., Ishchenko, O. V., Tarasenko, N. V., Budash, Yu. O., Kolodiy, A. I. (2023). Zastosuvannya napovnenykh dyspersiy vodorozchynnykh polimeriv dlya funktsionalizatsiyi voloknystykh materialiv [Application of filled dispersions of water-soluble polymers for functionalization of fibrous materials]. *Tekhnolohiyi ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, No. 1 (12), P. 73–85. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.1.7> [in Ukrainian].
4. Little, A. F., Christie, R. M. (2011). Textile Applications of Photochromic Dyes. Part 3: Factors Affecting the Technical Performance of Textiles Screen-Printed with Commercial Photochromic Dyes. *Color. Technol.*, № 127, P. 275–281. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2011.00307.x>.
5. Chun, Y. (2011). Preparation of Pigmented Ink-Jet Ink by a Combination of Surface Treatments and Synthetic Dispersant. *Color. Technol.*, № 127, P. 186–193. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2011.00297.x>.
6. Hu, J., Lu, J. (2014). Smart Polymers for Textile Applications. In: *Smart Polymers and Their Applications*. Woodhead Publishing: Sawston, UK. P. 437–475. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097026.2.437>.
7. Fortuniak, K., Redlich, G., Obersztyn, E. (2013). Assessment and Verification of the Functionality of New, Multi-Component, Camouflage Materials. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, № 101 (5), P. 73–79.
8. Mehravar, S., Ballard, N., Tomovska, R., Asua, J. M. (2019). Polyurethane/Acrylic Hybrid Waterborne Dispersions: Synthesis, Properties and Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 58, № 46, P. 20902–20922. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02324>.

## Література

1. Petrova L., Grishin R., Zimnurov A., Kozlova O., Odintsova O., Sangeeva E. Improvement of Textile Materials Processing Techniques by Applying Aqueous Dispersions of Polymers. *Coatings*. 2023. № 13 (2), 462. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings13020462>.
2. Engels H.-W., Pirkl H.-G., Albers R., Albach R. W., Krause J., Hoffmann A., ... Dormish J. Polyurethanes: Versatile Materials and Sustainable Problem Solvers for Today's Challenges. *Angewandte Chemie International Edition*. 2013. № 52 (36). P. 9422–9441. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201302766>.
3. Плаван В. П., Іщенко О. В., Тарасенко Н. В., Будащ Ю. О., Колодій А. І. Застосування наповнених дисперсій водорозчинних полімерів для функціоналізації волокнистих матеріалів. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 1 (12). С. 73–85. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.1.7>.
4. Little A. F., Christie R. M. Textile Applications of Photochromic Dyes. Part 3: Factors Affecting the Technical Performance of Textiles Screen-Printed with Commercial Photochromic Dyes. *Color. Technol.* 2011. № 127. P. 275–281. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2011.00307.x>.
5. Chun Y. Preparation of Pigmented Ink-Jet Ink by a Combination of Surface Treatments and Synthetic Dispersant. *Color. Technol.* 2011. № 127. P. 186–193. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2011.00297.x>.
6. Hu J., Lu J. Smart Polymers for Textile Applications. In: *Smart Polymers and Their Applications*. Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2014. P. 437–475. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097026.2.437>.
7. Fortuniak K., Redlich G., Obersztyn E. Assessment and Verification of the Functionality of New, Multi-Component, Camouflage Materials. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2013. № 101 (5). P. 73–79.
8. Mehravar S., Ballard N., Tomovska R., Asua J. M. Polyurethane/Acrylic Hybrid Waterborne Dispersions: Synthesis, Properties and Applications. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019. Vol. 58, № 46. P. 20902–20922. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02324>.

9. Avar, G., Meier-Westhues, U., Casselmann, H., Achten, D. (2012). Polyurethanes. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*, Vol. 10, P. 411–441. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00275-2>.
10. Danylkovych, A. H. (2006). *Praktykum z khimiyi ta tekhnolohiyi shkiry ta khutra: navch. posib.* [Workshop on chemistry and technology of leather and fur: study guide]. 2nd edition. Kyiv: Feniks. 340 p. [in Ukrainian].
11. Tkhir, I. H., Humenetsky, T. V. (2005). *Fyzyko-khimiya polimeriv* [Physico-chemistry of polymers]. Lviv: Publishing House of the National University "Lviv Polytechnic". 240 p. [in Ukrainian].
12. Karavayev, T. A. (2015). *Vodno-dispersiyni farby: tovaroznavcha otsinka: monohrafiya* [Water-dispersion paints: commodity assessment: monograph]. Kyiv: Kyiv National University of Trade and Economics. 288 p. [in Ukrainian].
13. Karavayev, T. A., Osyka, V. A., Komakha, V. O., Kaluha, N. V., Tkachuk, V. V., Sikorsky, O. O. (2019). *Protsesy khimichnoyi vzayemodiyi v systemi mineralnyy napovnyuvach–modyfikator–plivkoutvoryuvach* [Processes of chemical interaction in the mineral filler–modifier–film former system]. *Pytannya khimiyi ta khimichnoyi tekhnolohiyi = Questions of chemistry and chemical technology*, № 6, P. 83–91. DOI: 10.32434/0321-4095-2019-127-6-83-91 [in Ukrainian].
14. Kukanja, D., Golob, J., Zupancic-Valant, A., & Krajnc, M. (2000). The structure and properties of acrylic-polyurethane hybrid emulsions and comparison with physical blends. *Journal of Applied Polymer Science*, No. 78 (1), P. 67–80. DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/1097-4628\(20001003\)78:1%3C67::AID-APP100%3E3.0.CO;2-4](http://dx.doi.org/10.1002/1097-4628(20001003)78:1%3C67::AID-APP100%3E3.0.CO;2-4).
9. Avar G., Meier-Westhues U., Casselmann H. and Achten D. Polyurethanes. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*. 2012. Vol. 10. P. 411–441. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00275-2>.
10. Данилкович А. Г. Практикум з хімії та технології шкіри та хутра: навч. посіб. 2-ге видання. Київ: Фенікс, 2006. 340 с.
11. Тхір І. Г., Гуменецький Т. В. Фізико-хімія полімерів. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. 240 с.
12. Караваєв Т. А. Водно-дисперсійні фарби: товарознавча оцінка: монографія. Київ: Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2015. 288 с.
13. Караваєв Т. А., Осика В. А., Комаха В. О., Калуга Н. В., Ткачук В. В., Сікорський О. О. Процеси хімічної взаємодії в системі мінеральний наповнювач–модифікатор–плівкоутворювач. *Питання хімії та хімічної технології*. 2019. № 6. С. 83–91. DOI: 10.32434/0321-4095-2019-127-6-83-91.
14. Kukanja D., Golob J., Zupancic-Valant A., & Krajnc M. The structure and properties of acrylic-polyurethane hybrid emulsions and comparison with physical blends. *Journal of Applied Polymer Science*. 2000. № 78 (1). P. 67–80. DOI: [http://dx.doi.org/10.1002/1097-4628\(20001003\)78:1%3C67::AID-APP100%3E3.0.CO;2-4](http://dx.doi.org/10.1002/1097-4628(20001003)78:1%3C67::AID-APP100%3E3.0.CO;2-4).

**PLAVAN VIKTORIJA**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of Department of Chemical Technologies and  
Resource Saving, Kyiv National University of  
Technologies and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>  
Scopus Author ID: 6603130130  
Researcher ID: I-5852-2015  
E-mail: [plavan.vp@knutd.edu.ua](mailto:plavan.vp@knutd.edu.ua)

**OKHMAT OLENA**

Ph.D., Associate Professor,  
Department of Biotechnology, Leather and Fur,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0927-8706>  
Scopus Author ID: 57194089217  
Researcher ID: JFJ-5164-2023  
E-mail: [oxmat.oa@knutd.edu.ua](mailto:oxmat.oa@knutd.edu.ua)

**KOLODII ARTEM**

PhD student,  
Department of Chemical Technologies  
and Resource Saving,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0007-6771-6037>  
E-mail: [artem.kolodii@w-chem.com.ua](mailto:artem.kolodii@w-chem.com.ua)

**BOYCHENKO ANDRIY**

Limited Liability Company  
AGROTECHSHKIRA, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0009-3269-3255>  
Researcher ID: LFM-4282-2024  
E-mail: [atk@atk.kiev.ua](mailto:atk@atk.kiev.ua)

LATISHEV DMYTRO

Master student

Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine

E-mail: [ktphv@knuud.edu.ua](mailto:ktphv@knuud.edu.ua)

<sup>1</sup>PLAVAN V. P., <sup>1</sup>KOLODIY A. I., <sup>1</sup>OKHMAT O. A.,  
<sup>2</sup>BOYCHENKO A. Yu., <sup>1</sup>LATISHEV D. O.

<sup>1</sup>Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<sup>2</sup>Limited Liability Company AGROTECHSHKIRA, Ukraine

## COMPARATIVE EVALUATION OF THE POLYMER DISPERSIONS FOR THE FIBROUS MATERIALS SURFACE FUNCTIONALIZATION

**Purpose.** The purpose of the work is to analyze the properties of polymer dispersions with different chemical composition to determine the possibility of their further use as part of polymer coatings for the functionalization of fibrous materials.

**Methodology.** Different types of polymer materials have used in the work: Plextol UltraFine PR 3500K (Synthomer, Germany), Vinavil Eva 1612 (Vinavil, Italy), Crilat 4815 (Vinavil, Italy), Impranil DLP-R (Covestro, Germany). The quality of water-emulsion film-forming systems and the possibility of their use in the process of functionalization of the surface for fibrous bases have determined by the content of dry residue and viscosity, pH, film-forming ability and resistance to the action of electrolytes.

**Findings.** A comparative assessment of water-dispersible acrylic, vinyl and urethane polymers have made in order to determine the possibility of their further application for the functionalization of the surface of fibrous bases. It was determined that all polymer dispersions show resistance to the action of ammonium hydroxide. In addition, all polymer dispersions (with the exception of the aqueous dispersion of acrylic copolymer Plextol UltraFine PR 3500K) are resistant to sodium chloride, ammonium sulfate, and acetic acid. Given the close pH value, almost all polymer dispersions can be mixed without the risk of coagulation. In the future, it is of interest to determine the possibility of combining Crilat 4815 and Impranil DLP-R polymer dispersions when creating a hybrid acrylic-urethane coating for fibrous bases, given their similar resistance to electrolytes.

**Originality.** Finely dispersed emulsions of film-forming acrylic-urethane polymers of the new generation are able to modify the surface of the fibrous material through interaction with its functional groups, which makes it possible to create competitive fabrics with improved stable properties, in particular for technical applications.

**Practical value.** New types of water-dispersion systems on acrylic and urethane polymers are proposed for modifying the surface of fabrics in order to give fabrics new functional properties. It is expected that in these hybrid dispersions, the acrylic component will provide resistance to the action of alkalis and to external influences, while the polyurethane will increase the strength, flexibility and homogeneity of the formed film.

**Keywords:** polymer dispersions; polymer coatings; acrylic-urethane polymers; surface modification; functional properties.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.4.11>

УДК  
552.576.1:  
661.183.03:  
554.723.2

САБЄРОВА В. О., ТАМАРКІНА Ю. В.,  
РЕДЬКО А. В., КУЧЕРЕНКО В. О.

*Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М.Литвиненка НАН України*

## АДСОРБЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОПОРИСТИХ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ, ОТРИМАНИХ ЛУЖНОЮ АКТИВАЦІЄЮ З ТЕПЛОВИМ УДАРОМ

**Мета.** Дослідження адсорбційної активності нанопористих вуглецевих матеріалів (НВМ), отриманих лужною активацією з тепловим ударом.

**Методика.** Характеристики пористості НВМ розраховано за ізотермами низькотемпературної (77 К) адсорбції – десорбції азоту (метод 2D-NLDFT-HS). Адсорбційні вимірювання виконано при 25°C та постійному вмісті НВМ (1 г/л) у водних розчинах. Дані з кінетики адсорбції розраховано моделями I-го і II-го другого порядку та внутрішньочасткової дифузії. Ізотерми адсорбції апроксимовано моделями Ленгмюра та Фрейндліха.

**Результати.** Досліджено кінетику адсорбції фенолу (Ф), 4-хлорфенолу (ХФ), барвника метиленового блакитного (МБ) та катіонів свинцю зразками НВМ, які утворюються з бурого вугілля (НВМ(Б)) та довгополуменевого вугілля (НВМ(Д)) у новому процесі – лужній активації з тепловим ударом. Кінетичні дані отримано при однаковій початковій концентрації адсорбатів 5,0 ммоль/л. Встановлено, що адсорбційна рівновага досягається за 2-4 години залежно від адсорбату. Кінетика адсорбції підпорядковується рівнянню II-го порядку, а розраховані з нього максимальні адсорбційні ємності збільшуються в ряду  $Pb(II) < МБ < Ф < ХФ$  і знаходяться в межах 0,736–3,350 ммоль/г для НВМ(Б) та 1,097–4,359 ммоль/г для НВМ(Д). Швидкість адсорбції лімітується взаємодією молекул з поверхневими адсорбційними центрами, є найбільшою при адсорбції ХФ ( $\geq 1,672$  ммоль/г·хв) та найменшою – при адсорбції МБ ( $\leq 0,075$  ммоль/г·хв). За першу хвилину поглинається близько половини від максимальної адсорбованої кількості ХФ. Введення теплового удару формує НВМ із більш розвиненою пористою структурою без використання додаткових кількостей активанта (КОН). Застосування отриманих НВМ є найефективнішим в процесах адсорбційного очищення водних середовищ від фенольних сполук.

**Наукова новизна.** Вперше досліджено адсорбцію фенолу, 4-хлорфенолу, барвника метиленового блакитного та катіонів свинцю з водних розчинів (25°C) зразками НВМ, які утворюються з бурого та довгополуменевого вугілля у новому процесі – лужній активації з тепловим ударом.

**Практична значимість.** Результати дослідження сорбції дозволяють визначити напрями практичного використання НВМ як адсорбентів екоотоксикантів різної природи.

**Ключові слова:** нанопористі вуглецеві матеріали; адсорбція; фенольні сполуки; метиленовий блакитний; катіони свинцю.

**Вступ.** Термопрограмована лужна активація або термоліз вуглецевмісних речовин з КОН при 700-900°C є доволі поширеним методом отримання активованого вугілля з високою питомою поверхнею ( $\geq 1000$  м<sup>2</sup>/г) та розвиненою пористою структурою. Такі матеріали застосовуються в суперконденсаторах [1], при зберіганні природного газу [2] та водню [3], уловлюванні СО<sub>2</sub> як парникового газу [4], очищенні повітряних та водних середовищ від екоотоксикантів [5]. Цей напрямок розвивається шляхом вивчення нових видів сировини та активаторів (в основному, сполук калію [6]), умов нагрівання та попередньої хімічної обробки речовин-прекурсорів. Варіювання параметрів процесу суттєво змінює пористу структуру та адсорбційні властивості кінцевих вуглецевих матеріалів, що робить їх вивчення актуальним та практично важливим завданням.

Раніше запропоновано новий метод лужної активації [7], у якому повільне ( $\leq 10$  град/хв) термопрограмоване нагрівання замінено тепловим ударом – швидким введенням суміші вугілля-КОН у попередньо нагріту до температури активації (700 – 850°C) зону реактора. Цей метод, який отримав назву лужна активація з тепловим ударом, застосовується для конверсії

вугілля різного ступеня метаморфізму (від бурого вугілля до антрацитів), але є найефективнішим для переробки низькометаморфізованого вугілля з вмістом вуглецю в інтервалі 70–82% [8]. Важливою технологічною та екологічною перевагою є те, що ця активація найефективніша при малому співвідношенні КОН/вугілля ( $R_{\text{KOH}} = 1,0$  г/г) і призводить до утворення нанопористих вуглецевих матеріалів (НВМ) зі збільшеною площею питомої поверхні ( $\leq 1,8$  разів) і розвиненішою нанопористістю. Такі НВМ також характеризуються підвищеним об'ємом субнанопор – пор з діаметром ( $D \leq 1$  нм), які визначають аномально велику електричну ємність суперконденсаторів [9, 10], високу адсорбційну ємність за  $\text{CO}_2$  [11], формування шарів адсорбованого  $\text{H}_2$  з щільністю рідкого або твердого водню [3], можливість поділу катіонів за розмірами в процесі циклічного заряду/розряду при електросорбції [12].

Результати дослідження пористої структури НВМ з викопного вугілля наведено в роботі [13]. Адсорбційні властивості НВМ поки що не відомі, хоча їх вивчення є актуальним завданням з огляду на потенційне практичне застосування НВМ, зокрема, для очищення водних та повітряних середовищ від екотоксикантів.

**Постановка завдання.** Зразки АВ, отримані термопрограмованою активацією при великих співвідношеннях КОН ( $R_{\text{KOH}} = 3\text{--}4$  г/г), виявляють високу адсорбційну ємність по відношенню до адсорбатів різної природи [14–17]. Вуглецеві матеріали, отримані з викопного вугілля при  $R_{\text{KOH}} = 1,0$  г/г, також характеризуються великою адсорбційною ємністю за фенольними сполуками, органічними барвниками, елементним йодом [18, 19].

Можна припустити, що і нові НВМ, які отримано з використанням теплового удару, також будуть виявляти більш високу адсорбційну активність за рахунок розвиненішої нанопористості. Проте, така інформація в літературі відсутня, хоча характеристики пористої структури цих матеріалів роблять їх перспективними для використання в адсорбційних процесах уловлювання екотоксикантів.

Мета роботи – дослідження адсорбційної активності НВМ щодо фенолу, 4-хлорфенолу, метиленового блакитного та катіонів свинцю, як до представників органічних екотоксикантів, катіонів важких металів та барвників-забруднювачів.

**Результати дослідження.** Для дослідження обрано два зразки НВМ, які синтезовано з бурого вугілля (Б) та довгополуменевого вугілля (Д) лужною активацією з тепловим ударом при  $800^\circ\text{C}$  і  $R_{\text{KOH}} = 1,0$  г/г [13]. Їх позначено як НВМ(Б) та НВМ(Д); відповідні виходи складають 22,7% та 43,4%. Саме ці зразки демонструють найбільший позитивний вплив теплового удару на пористу структуру, який проявляється у підвищенні питомої поверхні в 1,8 рази для вугілля Б та в 1,3 рази для вугілля Д [8].

Характеристики пористості НВМ визначено за ізотермами низькотемпературної (77 К) адсорбції – десорбції азоту (прилад Micromeritics ASAP 2020). Загальний об'єм пор  $V_t$  ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) визначали за кількістю  $\text{N}_2$ , адсорбованого при відносному тиску  $p/p_0 \sim 1,0$ . Методом 2D-NLDFT-HS (2-Dimensional Non-local Density Functional Theory, Heterogenous Surface) [20] (програма SAIEUS) розраховували інтегральні та диференційні залежності питомої поверхні  $S_{\text{DFT}}$  ( $\text{m}^2/\text{g}$ ) та об'єму пор  $V$  ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) від середнього діаметру пор ( $D$ , нм). З інтегральних залежностей « $V - D$ » та « $S_{\text{DFT}} - D$ » визначали об'єми ультрамікропор ( $V_{\text{umi}}$ ), супермікропор ( $V_{\text{smi}}$ ), субнанопор ( $V_{1\text{nm}}$ ) та мікропор ( $V_{\text{mi}}$ );  $V_{\text{mi}} = V_{\text{umi}} + V_{\text{smi}}$ . Сумарний об'єм мезо- і макропор розраховували за різницею  $V_{\text{me+ma}} = V_t - V_{\text{mi}}$ . Аналогічно визначали питому поверхню ультрамікропор ( $S_{\text{umi}}$ ), супермікропор ( $S_{\text{smi}}$ ), субнанопор ( $S_{1\text{nm}}$ ) та мікропор ( $S_{\text{mi}}$ ) та сумарну поверхню мезо- і макропор ( $S_{\text{me+ma}}$ ). Позначення пор та їхні середні діаметри прийнято відповідно до рекомендації IUPAC [21]: ультрамікропори ( $D \leq 0,7$  нм), супермікропори ( $D = 0,7\text{--}2,0$  нм), мікропори ( $D \leq 2,0$  нм). Зазначені вище категорії пор об'єднуються терміном «нанопори» з верхньою межею  $D \leq 100$  нм [21].

Адсорбційну ємність за обраними адсорбатами  $A_{AD}$  (ммоль/г), де АД – фенол (Ф), 4-хлорфенол (ХФ), метиленовий блакитний (МБ) або катіони свинцю (П) в розчині  $Pb(NO_3)_2$  визначали наступним чином. Наважку ( $m = 0,100$  г) висушеного при  $120 \pm 10^\circ C$  зразка НВМ поміщали в колбу Ерленмейєра, вводили об'єм ( $V = 100$  см<sup>3</sup>) водного розчину адсорбату заданої початкової концентрації ( $C_{AD(0)}$ , ммоль/л) та струшували при  $25 \pm 0,5^\circ C$  (200 об/хв, баня-шейкер МАХТURDY-45, Daihan Scientific Co). У всіх дослідах вміст НВМ в розчині адсорбату був постійним – 1 г/л. Після закінчення заданого часу суміш фільтрували та вимірювали поточну концентрацію  $C_{AD}$  (при вимірі кінетики адсорбції) або рівноважну концентрацію  $C_{AD(e)}$  (при реестрації ізотерм адсорбції). Концентрацію фенолу, 4-хлорфенолу та МБ визначали порівнянням з калібрувальними графіками оптичної щільності розчину, вимірюючи спектрофотометром Perkin-Elmer Lambda 20 при довжинах хвиль 270 нм, 280 нм та 665 нм, відповідно [18, 19]. Концентрацію катіонів  $Pb(II)$  визначали титруванням розчином трилону-Б (0,005 М) у присутності ксиленолового оранжевого (0,05%) [22].

Адсорбційну ємність  $A_{AD}$  розраховували за формулою  $A_{AD} = (C_{AD(0)} - C_{AD}) \times V/m$ . Також визначали максимально досяжну адсорбційну ємність  $A_{AD(m)}$  та питому адсорбційну ємність  $A_{AD(S)} = 1000 \times A_{AD(m)} / S_{DFT}$  (мкмоль/м<sup>2</sup>), яка пропорційна поверхневій концентрації адсорбційних центрів вуглецевого матеріалу.

Дані по кінетиці адсорбції апроксимували моделями I-го першого порядку (1), II-го другого порядку (2) та внутрішньочасткової дифузії (3) [23, 24]:

$$A_{AD} = A_{AD(m)} [1 - \exp(-k_1 \tau)] \quad (1)$$

$$A_{AD} = k_2 A_{AD(m)}^2 \tau / (1 + k_2 A_{AD(m)} \tau) \quad (2)$$

$$A = k_d \tau^{0.5} + C \quad (3)$$

де  $A_{AD(m)}$  – максимальна адсорбційна ємність;

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_d$  – константи I-го порядку, II-го порядку та внутрішньочасткової дифузії, відповідно;

$\tau$  – час адсорбції;

$C$  – відсіченій відрізок вісі  $Y$ .

Для розрахунку ізотерм адсорбції використовували двопараметрові моделі Ленгмюра (4) і Фрейндліха (5) [25]

$$A_{AD(e)} = A_{AD(L)} k_{AD(L)} C_{AD(e)} / (1 + k_{AD(L)} C_{AD(e)}) \quad (4)$$

$$A_{AD(e)} = k_{AD(F)} \cdot C_{AD(e)}^{1/n} \quad (5)$$

де  $A_{AD(L)}$  – адсорбційна ємність, яка відповідає насиченому моношару адсорбату;  $k_{AD(L)}$  – константа рівняння Ленгмюра,  $k_{AD(F)}$  та  $n$  – константи рівняння Фрейндліха.

Пориста структура НВМ. Об'єми та питомі поверхні різних пор зразків НВМ(Б) та НВМ(Д) наведено в табл. 1 та 2.

Таблиця 1

Об'єми різних пор зразків НВМ(Б) та НВМ(Д)

Зразок	$V_t$ , см <sup>3</sup> /Г	$V_{umi}$ , см <sup>3</sup> /Г	$V_{smi}$ , см <sup>3</sup> /Г	$V_{1nm}$ , см <sup>3</sup> /Г	$V_{mi}$ , см <sup>3</sup> /Г	$V_{me+ma}$ , см <sup>3</sup> /Г
НВМ(Б)	1,08	0,33	0,36	0,54	0,69	0,39
НВМ(Д)	0,77	0,41	0,20	0,54	0,61	0,16

Таблиця 2

Питомі поверхні пор зразків НВМ(Б) та НВМ(Д)

Зразок	$S_{DFT}, M^2/Г$	$S_{umi}, M^2/Г$	$S_{smi}, M^2/Г$	$S_{1nm}, M^2/Г$	$S_{mi}, M^2/Г$	$S_{me+ma}, M^2/Г$
НВМ(Б)	2012	1153	753	1688	1906	205
НВМ(Д)	1950	1470	433	1807	1903	47

Зіставлення характеристик зразків показує наступне. Загальний об'єм пор буровугільного НВМ(Б) значно (на  $0,31 \text{ см}^3/Г$ ) більший ніж величина  $V_t$  у зразка НВМ(Д) за рахунок більшого об'єму мезо- і макропор (на  $0,23 \text{ см}^3/Г$ ) та мікропор (на  $0,08 \text{ см}^3/Г$ ). Це зумовлено вищим виходом летких продуктів з бурого вугілля при його термохемолізі з КОН, що веде до меншого виходу НВМ та утворення великих пор у його просторовому каркасі. Об'єми субнанопор обох зразків однакові, але їх частки в загальному об'ємі пор істотно відрізняються і становлять  $\sim 50\%$  у НВМ(Б) і  $\sim 70\%$  у НВМ(Д). Зразок НВМ(Д) також характеризується домінуванням ультрамікропор у мікропористому діапазоні: співвідношення  $V_{umi}/V_{smi}$  становить  $\sim 2$ , тоді як у зразка НВМ(Б) –  $0,9$ . Це відображається і на величинах питомої поверхні різних пор (табл. 2). Питома поверхня ультрамікропор  $S_{umi}$  зразка НВМ(Д) приблизно в 1,3 рази більша, хоча поверхня мікропор  $S_{mi}$  обох матеріалів однакова. Майже однакова і загальна питома поверхня  $S_{DFT}$ . Тобто, при активації довгополуменевого вугілля утворюється НВМ з більш розвинутою субнанопористістю за рахунок домінуючого утворення ультрамікропор ( $D \leq 0,7 \text{ нм}$ ).

**Кінетика адсорбції.** Наведені на рис. 1 та 2 кінетичні криві адсорбції зареєстровані при однаковій початковій концентрації обраних речовин  $C_{AD(0)} = 5 \text{ ммоль/л}$  та показують, що адсорбційні рівноваги досягаються за 2–4 год залежно від природи адсорбату. Кінетичні дані апроксимовано моделями I-го порядку, II-го порядку та внутрішньочасткової дифузії. Кінетика адсорбції обраних сполук зразками НВМ(Б) та НВМ(Д) погано апроксимується моделлю першого порядку: коефіцієнти детермінації варіюються в межах  $R^2 = 0,723\text{--}0,942$ .

Для опису поглинання адсорбатів краще підходить кінетична модель другого порядку, за якою розраховано суцільні лінії на рис. 1 і 2. Ця модель стверджує, що швидкість адсорбції лімітується взаємодією адсорбату з поверхневими адсорбційними центрами [23], а не дифузією в пористу систему НВМ. Лінеаризацією в координатах « $(t/A_{AD}) - t$ » розраховано величини максимальної ємності  $A_{AD(m)}$  та константи  $k_2$ , які наведено в табл. 3.

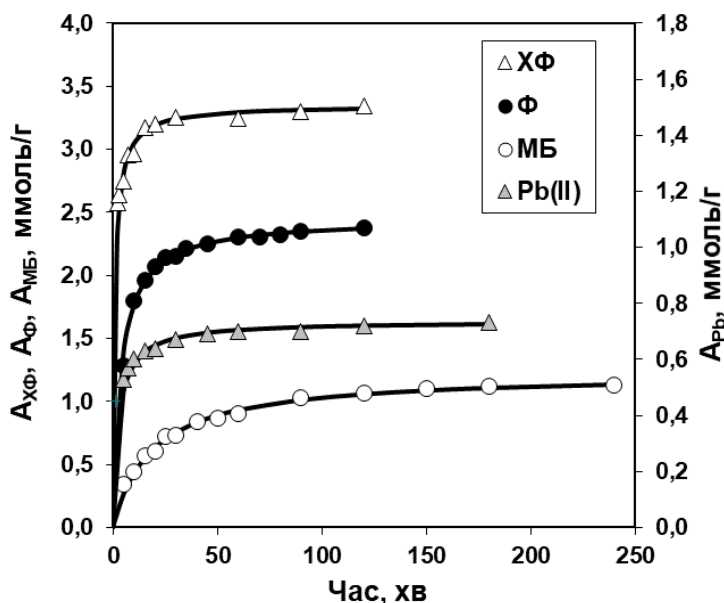


Рис. 1. Кінетика адсорбції зразком НВМ(Б)

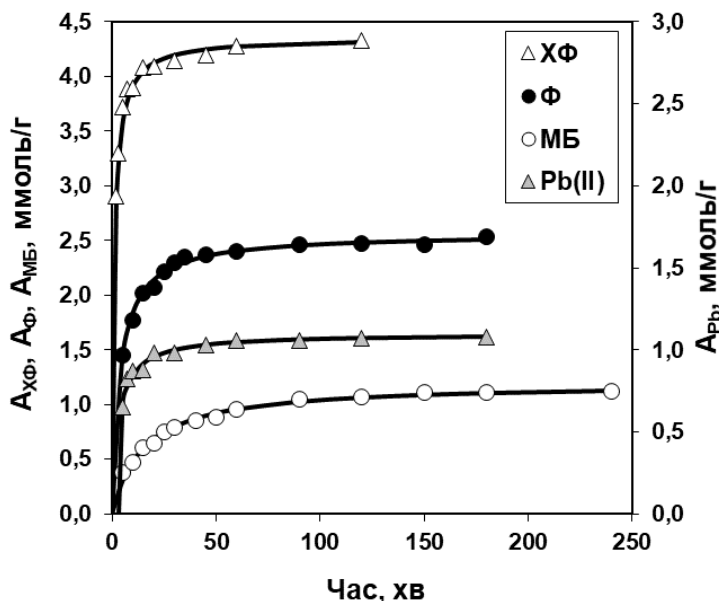


Рис. 2. Кінетика адсорбції зразком НВМ(Д)

Таблиця 3

Параметри кінетичної моделі першого порядку адсорбції зразками НВМ(Б) та НВМ(Д)

Зразок	Параметр	Адсорбат			
		Ф	ХФ	МБ	РЬ(ІІ)
НВМ(Б)	$A_{AD(m)}$ , ммоль/г	2,451	3,350	1,219	0,736
	$k_2 \times 10^2$ , г/ммоль·хв	10,3	29,7	4,36	50,2
	$A_{AD(1)}$ , ммоль/г	0,495	1,672	0,062	0,199
	$A_{AD(1)}/A_{AD(m)}$ , %	20,2	49,9	7,5	27,0
	$A_{AD(s)}$ , мкмоль/м <sup>2</sup>	1,22	1,67	0,56	0,36
	$R^2$	0,998	0,999	0,998	0,999
НВМ(Д)	$A_{AD(m)}$ , ммоль/г	2,561	4,359	1,200	1,097
	$k_2 \times 10^2$ , г/ммоль·хв	9,81	20,31	5,56	30,97
	$A_{AD(1)}$ , ммоль/г	0,514	2,050	0,075	0,278
	$A_{AD(1)}/A_{AD(m)}$ , %	20,1	47,0	6,3	25,3
	$A_{AD(s)}$ , мкмоль/м <sup>2</sup>	1,31	2,22	0,62	0,56
	$R^2$	0,997	0,999	0,998	0,993

Аналіз значень коефіцієнтів рівняння II-го порядку показує наступне. Найбільші адсорбційні ємності НВМ виявляються при поглинанні ХФ, найменші – при адсорбції катіонів свинцю. Величини  $A_{AD(m)}$  розрізняються для різних речовин у 4,0–4,6 рази та для обох зразків НВМ зростають у ряді адсорбатів  $Pb(II) < MB < \Phi < X\Phi$ . Значення констант  $k_2$  відповідають іншому ряду  $MB < \Phi < X\Phi < Pb(II)$ , а величини  $k_2$  для різних адсорбатів відрізняються в 11,5 рази для НВМ(Б) та в 5,6 рази для НВМ(Д). Порівняння отриманих (табл. 3) та даних літератури [15, 16, 26-28] показує, що зразки НВМ(Б) та НВМ(Д) характеризуються досить високими адсорбційними ємностями за всіма адсорбатами. Більшою мірою це стосується поглинання фенольних сполук: адсорбційні ємності за фенолом та ХФ знаходяться у верхній межі інтервалу опублікованих значень [19, 26].

Уявлення про швидкість адсорбції зразками НВМ дає співставлення величин  $A_{AD(1)}$  (табл. 3), які розраховано з рівняння другого порядку при часі адсорбції  $\tau = 1$  хв. Цей параметр вперше запропоновано в роботі [29] з метою оцінки швидкості поглинання в початковий період адсорбції. Судячи з величин  $A_{AD(1)}$ , найбільша початкова швидкість спостерігається при адсорбції ХФ, найменша – при адсорбції МБ. Відмінність у чисельних значеннях швидкостей

для різних адсорбатів значна – у 27 разів для обох зразків НВМ. Відповідно, співвідношення  $A_{Ад(1)}/A_{Ад(m)}$  показує ефективність поглинання адсорбатів зразками НВМ у початковий період. З даних табл. 3 видно, що мінімальну ефективність зразки НВМ показують при адсорбції МБ (6,3–7,5% від величини  $A_{МБ(m)}$ ), а максимальну – при адсорбції ХФ: за першу хвилину процесу поглинається близько половини від максимальної кількості адсорбованої сполуки.

Обидва зразки НВМ адсорбують ХФ у більшій кількості та з більшою швидкістю ніж фенол. Подібний ефект виявлено при адсорбції фенольних сполук зразками НВМ, отриманих термопрограмованою активацією викопного вугілля [19]. Якщо швидкість адсорбції визначається дифузією, можна було очікувати меншу швидкість поглинання ХФ, оскільки розміри молекули ХФ більші і їхній транспорт до мікропористої структури більш ускладнений. Отримані дані (табл. 3) свідчать про протилежне: адсорбція ХФ обома зразками перебігає значно швидше – в 3,4–4,0 рази, судячи з порівняння величин  $A_{Ф(1)}$  та  $A_{ХФ(1)}$ . Це є додатковим підтвердженням того, що швидкість адсорбції зразками НВМ(Б) та НВМ(Д) лімітується взаємодією з поверхневими адсорбційними центрами, тобто фізичною сорбцією та хемосорбцією.

Зазвичай кінетичні дані додатково апроксимують моделлю внутрішньочасткової дифузії (3) для виявлення процесів, які лімітують швидкість адсорбції. Як приклад на рис. 3 показано застосування цієї моделі для зразка НВМ(Д). Буровугільний зразок – НВМ(Б) показує дуже схожу картину; відмінності полягають лише в чисельних значеннях коефіцієнтів, які зведено в табл. 4. Ця модель передбачає наступне: 1) якщо дифузія всередину часток НВМ є визначальною стадією, то залежність адсорбційної ємності  $A_{Ад}$  від  $\tau^{0,5}$  проходить через початок координат і величина  $C_{d1} = 0$ ; 2) наявність декількох лінійних ділянок свідчить про присутність різних механізмів адсорбції [24]. Для зразків НВМ(Б) та НВМ(Д) залежності  $A_{Ад}$  від  $\tau^{0,5}$  показують дві лінійні ділянки, а перші з них не проходять через початок координат ( $C_{d1} > 0$ ), що додатково підтверджує відсутність дифузійних обмежень у початковий період адсорбції.

Звернемо увагу, що адсорбція МБ характеризується малими величинами  $C_{d1}$ , особливо  $C_{d1} = 0,06$  ммоль/г для НВМ(Б), отже швидкість поглинання цього адсорбату може лімітуватися дифузією. До того ж, порівняно з іншими адсорбатами молекули МБ мають значно більші розміри, що ускладнює їх транспортування до мікропористої структури НВМ. Для інших адсорбатів такі транспортні обмеження відсутні.

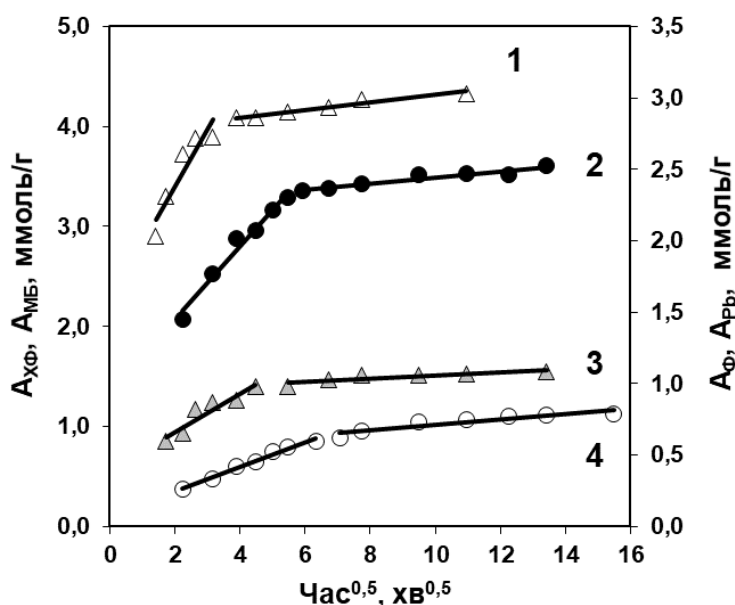


Рис. 3. Застосування моделі внутрішньочасткової дифузії для адсорбції зразком НВМ(Д): 1 – ХФ, 2 – Ф, 3 – Рb(II), 4 – МБ

Таблиця 4

Параметри моделі внутрішньочасткової дифузії

Зразок	Адсорбат	Параметри					
		$k_{d1}$ , ммоль/Г·хв <sup>0,5</sup>	$k_{d2}$ , ммоль/Г·хв <sup>0,5</sup>	$C_{d1}$ , ммоль/Г	$C_{d2}$ , ммоль/Г	$R^2_{d1}$	$R^2_{d2}$
НВМ(Б)	Ф	0,300	0,039	0,726	1,974	0,914	0,922
	ХФ	0,244	0,019	2,230	3,120	0,965	0,89
	МБ	0,127	0,034	0,060	0,651	0,976	0,901
	Pb(II)	0,060	0,009	0,406	0,618	0,964	0,869
НВМ(Д)	Ф	0,256	0,021	0,937	2,232	0,973	0,916
	ХФ	0,570	0,038	2,265	3,941	0,857	0,945
	МБ	0,123	0,027	0,107	0,751	0,985	0,818
	Pb(II)	0,134	0,011	0,395	0,952	0,891	0,721

Ізотерми адсорбції зразками НВМ(Б) та НВМ(Д) наведено на рис. 4 і 5. Для їх апроксимації застосовано моделі Ленгмюра (4) і Фрейндліха (5), які найчастіше використовуються для процесів поглинання обраних адсорбатів з водних середовищ. З лінеаризованих форм цих моделей розраховано значення коефіцієнтів рівняння Ленгмюра (в координатах « $(C_{Ад(е)} / A_{Ад(е)}) - C_{Ад(е)}$ ») та Фрейндліха (в координатах « $(\ln A_{Ад(е)} - \ln C_{Ад(е)})$ »), які наведено в табл. 5.

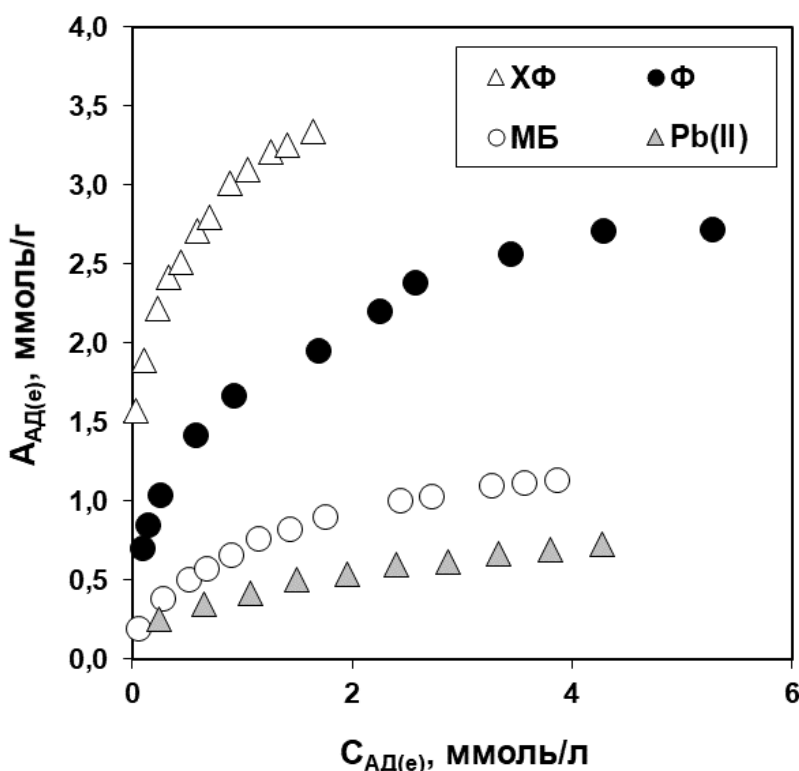


Рис. 4. Ізотерми адсорбції зразком НВМ(Б)

Модель Ленгмюра стверджує, що поверхня НВМ є хімічно однорідною і максимальна адсорбційна ємність відповідає насиченому моношару адсорбату  $A_{Ад(L)}$ . Модель Фрейндліха передбачає багатозарову адсорбцію на хімічно неоднорідній поверхні, яка містить різні за активністю адсорбційні центри. Коефіцієнт  $1/n$  враховує неоднорідність поверхні, що виражається у різних величинах енергії взаємодії адсорбційних центрів та молекул адсорбату. За умови  $0 < 1/n < 1$  адсорбція сприятлива, при  $1/n > 1$  процес адсорбції не вигідний [25].

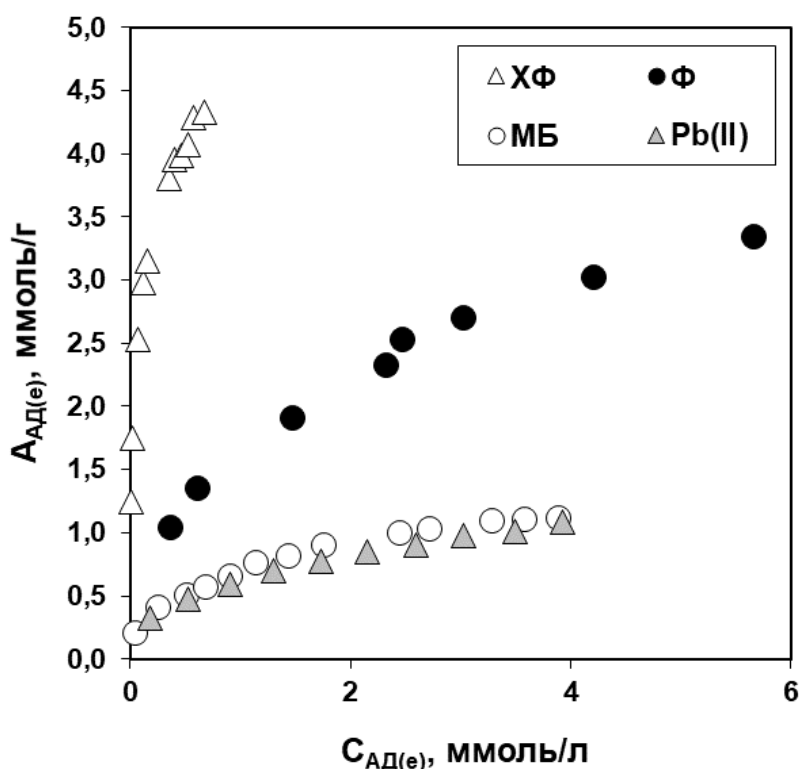


Рис. 5. Ізотерми адсорбції зразком НВМ(Д)

Таблиця 5

Параметри моделей ізотерм адсорбції зразками НВМ(Б) та НВМ(Д)

Зразок	Модель	Параметр	Адсорбат			
			Ф	ХФ	МБ	Рb(II)
НВМ(Б)	Ленгмюра	$A_{Ад(L)}$ , ммоль/г	2,965	3,514	1,337	0,933
		$k_{Ад(L)}$ , л/ммоль	1,76	7,67	1,28	0,82
		$R^2$	0,990	0,994	0,987	0,993
	Фрейндліха	$k_{Ад(F)}$ , $(ммоль/г)(л/ммоль)^{1/n}$	1,65	3,03	0,67	0,42
		$1/n$	0,348	0,207	0,435	0,353
		$R^2$	0,994	0,998	0,995	0,986
НВМ(Д)	Ленгмюра	$A_{Ад(L)}$ , ммоль/г	4,187	4,484	1,296	1,458
		$k_{Ад(L)}$ , л/ммоль	0,66	22,30	1,45	0,76
		$R^2$	0,987	0,994	0,981	0,988
	Фрейндліха	$k_{Ад(F)}$ , $(ммоль/г)(л/ммоль)^{1/n}$	1,64	4,94	0,69	0,62
		$1/n$	0,423	0,255	0,381	0,378
		$R^2$	0,995	0,997	0,995	0,993

Обидві моделі описують ізотерми з близькими похибками, але модель Фрейндліха апроксимує з більшими коефіцієнтами детермінації. Це є наслідком того, що досліджені зразки НВМ мають неодноріднішу поверхню внаслідок імпульсного («вибухоподібного») утворення летких продуктів при тепловому ударі.

Величини  $A_{Ад(L)}$ , які відповідають насиченому шару адсорбата, розрізняються для різних речовин у 4,0–4,5 рази і для обох зразків НВМ зростають у тому ж ряду адсорбатів, що і значення  $A_{Ад(m)}$ : Рb(II) < МБ < Ф < ХФ. Такий самий ряд виконується для констант  $k_{Ад(L)}$  зразка НВМ(Б). Для зразка НВМ(Д) зареєстровано іншу послідовність величин  $k_{Ад(L)}$

( $\Phi < \text{Pb(II)} < \text{МБ} < \text{ХФ}$ ) з найменшою константою для фенолу ( $k_{\text{Ф(L)}} = 0,66$  л/ммоль). Константи для НВМ(Б) відрізняються для різних адсорбатів у 9,4 рази, для НВМ(Д) – у 33,8 рази, тобто адсорбційна активність НВМ з довгополуменевого вугілля більш чутлива до природи адсорбату.

Порівняння параметрів адсорбції для двох зразків НВМ показує наступне.

Ємності за фенолом та МБ практично однакові; константи  $k_2$  близькі. Зразок НВМ(Д) адсорбує більшу кількість ХФ (в 1,3 рази); константа  $k_2$  – в 1,5 рази більша. Цей самий зразок поглинає більше катіонів свинцю (в 1,2 рази), хоча константа  $k_2$  менша (в 1,6 рази). Для всіх адсорбатів питомі адсорбційні ємності  $A_{\text{Ад(S)}}$  зразка НВМ(Д) більші, ніж у НВМ(Б). Для  $\Phi$  та МБ таке перевищення невелике, а для ХФ і  $\text{Pb(II)}$  більше і складає 1,33 (ХФ) та 1,55 (Pb). Більша поверхнева концентрація адсорбованих речовин ХФ та  $\text{Pb(II)}$  у зразка НВМ(Д) свідчить про наявність додаткових маршрутів їх взаємодії, яка зміщує адсорбційну рівновагу. Також ймовірно, що НВМ(Д) має додаткову кількість адсорбційних центрів, які активні тільки по відношенню до ХФ та  $\text{Pb(II)}$ . Це може бути наслідком структурних відмінностей двох НВМ, зокрема різної кількості функціональних груп (іонний обмін з катіонами свинцю) та графенових фрагментів просторової структури НВМ ( $\pi$ -сорбція  $\text{Pb(II)}$  та ХФ) [16, 30]. Судячи з величин  $A_{\text{Ад(1)}}$ , швидкість адсорбції фенолу обома матеріалами приблизно однакова (табл. 3). Інші адсорбати поглинаються зразком НВМ(Д) швидше: ХФ у 1,22 рази; МБ у 1,21 рази; катіони  $\text{Pb(II)}$  у 1,40 рази. До того ж, у нього розвиненіша субнанопориста поверхня (табл. 2) і приблизно в 2 рази більший вихід. Отже, при однаковій загальній площі поверхні, зразок НВМ(Д) як адсорбент є ефективнішим ніж матеріал НВМ(Б) з бурого вугілля.

#### Висновки.

1. Вперше досліджено адсорбцію фенолу ( $\Phi$ ), 4-хлорфенолу (ХФ), барвника метиленового блакитного (МБ) та катіонів свинцю з водних розчинів ( $25^\circ\text{C}$ ) нанопористими вуглецевими матеріалами (НВМ), які утворюються з бурого вугілля (НВМ(Б)) та довгополуменевого вугілля (НВМ(Д)) у новому процесі – лужній активації з тепловим ударом.

2. Адсорбційна рівновага досягається за 2 – 4 години залежно від адсорбату. Кінетика адсорбції підпорядковується рівнянню II-го порядку, а розраховані з нього максимальні адсорбційні ємності збільшуються в ряду  $\text{Pb(II)} < \text{МБ} < \Phi < \text{ХФ}$  і знаходяться в межах 0,736–3,350 ммоль/г для НВМ(Б) та 1,097–4,359 ммоль/г для НВМ(Д).

3. Початкова швидкість поглинання є найбільшою при адсорбції ХФ (1,672 та 2,050 ммоль/г·хв), найменша – при адсорбції МБ (0,062 та 0,075 ммоль/г·хв). Швидкість адсорбції лімітується взаємодією молекул з поверхневими адсорбційними центрами, а не дифузією до пористої структури НВМ.

4. Ізотерми адсорбції апроксимуються моделями Ленгмюра ( $R^2 = 0,981\text{--}0,994$ ) та Фрейндліха ( $R^2 = 0,986\text{--}0,998$ ) з близькою похибкою. Розраховані з моделі Ленгмюра ємності насичених шарів адсорбатів збільшуються в ряді  $\text{Pb(II)} < \text{МБ} < \Phi < \text{ХФ}$ . Модель Фрейндліха, яка передбачає хімічно неоднорідну поверхню адсорбенту, застосовується краще. Це, ймовірно, є наслідком того, що хімічна будова адсорбційних центрів НВМ є більш різноманітною через «вибухоподібне» утворення летких продуктів при тепловому ударі.

5. Введення теплового удару формує НВМ з більш розвиненою пористою структурою без використання додаткових кількостей активанту (КОН). Застосування отриманих НВМ найбільш ефективно в процесах адсорбційного очищення водних середовищ від фенольних сполук.

Подальші дослідження, пов'язані з НВМ на основі викопного вугілля, будуть спрямовані на дослідження інших практичних застосувань, зокрема, як електродних матеріалів для суперконденсаторів-іоністорів, адсорбентів для зберігання природного газу та водню, а також для уловлювання діоксиду вуглецю як парникового газу.

## References

1. Bora, M., Bhattacharjya, D., Saikia, B. K. (2021). Coal-derived activated carbon for electrochemical energy storage: status on supercapacitor, Li-Ion battery, and Li-S battery applications. *Energy Fuels*, Vol. 35, Iss. 22, P. 18285–18307. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02518>.
2. Kumar, K. V., Preuss, K., Titirici, M.-M., Rodríguez-Reinoso, F. (2017). Nanoporous materials for the onboard storage of natural gas. *Chem. Rev.*, Vol. 117, Iss. 3, P. 1796–1825. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00505>.
3. So, S. H., Lee, S., Mun, J., Rho, J., Park, C. R. (2023). What induces the dense storage of hydrogen of liquid- or solid-like density levels in carbon nanopores with sub-1 nm diameters? *Carbon*, Vol. 204, P. 594–600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.12.057>.
4. Malini, K., Selvakumar, D., Kumar, N. S. (2023). Activated carbon from biomass: Preparation, factors improving basicity and surface properties for enhanced CO<sub>2</sub> capture capacity – A review. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, Vol. 67, Art. 102318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102318>.
5. Zhao, C., Ge, L., Mai, L., Li, X., Chen, S., Li, Q., Li, S., Yao, L., Wang, Y., Xu, C. (2023). Review on coal-based activated carbon: preparation, modification, application, regeneration, and perspectives. *Energy Fuels*, Vol. 37, Iss. 16, P. 11622–11642. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c01866>.
6. Singh, G., Ruban, A. M., Geng, X., Vinu, A. (2023). Recognizing the potential of K-salts, apart from KOH, for generating porous carbons using chemical activation. *Chem. Eng. J.*, Vol. 451, Iss. 4, Art. 139045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139045>.
7. Kucherenko, V. O., Tamarkina, Yu. V., Popov, A. F. (2016). Luzhna actyvatsiya z teplovym udarom – novyi sposib otrymannya nanoporuvatyh vygletsevyh materialiv [Thermal-shock alkali activation as a new method of the preparation of nanoporous carbon adsorbents]. *Dopovidi Natsional'noi Akademii Nauk Ukrainy = Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 74–81. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2016.12.074> [in Ukrainian].
8. Sabierova, V. A., Tamarkina, Yu. V., Kucherenko, V. A. (2021). Efficiency of thermal shock in the thermal alkaline conversion of fossil coals into nanoporous materials. *Solid Fuel Chemistry*, Vol. 55, No. 2, P. 110–116. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0361521921020075>.

## Література

1. Bora M., Bhattacharjya D., Saikia B. K. Coal-derived activated carbon for electrochemical energy storage: status on supercapacitor, Li-Ion battery, and Li-S battery applications. *Energy Fuels*. 2021. Vol. 35. Iss. 22. P. 18285–18307. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02518>.
2. Kumar K. V., Preuss K., Titirici M.-M., Rodríguez-Reinoso F. Nanoporous materials for the onboard storage of natural gas. *Chem. Rev.* 2017. Vol. 117. Iss. 3. P. 1796–1825. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00505>.
3. So S. H., Lee S., Mun J., Rho J., Park C. R. What induces the dense storage of hydrogen of liquid- or solid-like density levels in carbon nanopores with sub-1 nm diameters? *Carbon*. 2023. Vol. 204. P. 594–600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.12.057>.
4. Malini K., Selvakumar D., Kumar N. S. Activated carbon from biomass: Preparation, factors improving basicity and surface properties for enhanced CO<sub>2</sub> capture capacity – A review. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*. 2023. Vol. 67. Art. 102318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102318>.
5. Zhao C., Ge L., Mai L., Li X., Chen S., Li Q., Li S., Yao L., Wang Y., Xu C. Review on coal-based activated carbon: preparation, modification, application, regeneration, and perspectives. *Energy Fuels*. 2023. Vol. 37. Iss. 16. P. 11622–11642. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c01866>.
6. Singh G., Ruban A.M., Geng X., Vinu A. Recognizing the potential of K-salts, apart from KOH, for generating porous carbons using chemical activation. *Chem. Eng. J.* 2023. Vol. 451, Iss. 4. Art. 139045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139045>.
7. Кучеренко В. О., Тамаркіна Ю. В., Попов А. Ф. Лужна активація з тепловим ударом – новий спосіб отримання нанопоруватих вуглецевих адсорбентів. *Доповіді НАН України*. 2016. № 12. С. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2016.12.074>.
8. Sabierova V. A., Tamarkina Yu. V., Kucherenko V. A. Efficiency of Thermal Shock in the Thermal Alkaline Conversion of Fossil Coals into Nanoporous Materials. *Solid Fuel Chemistry*. 2021. Vol. 55, No. 2. P. 110–116.

9. Chmiola, J., Yushin, G., Gogotsi, Y., Portet, C., Simon, P., Taberna, P. L. (2006). Anomalous increase in carbon capacitance at pore sizes less than 1 nanometer. *Science*, Vol. 313, Iss. 5794, P. 1760–1763. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1132195>.
10. Jiang, Y., Chen, J., Zeng, Q., Zou, Z., Li, J., Zeng, L., Sun, W., Li, C. M. (2022). Facile method to produce sub-1 nm pore-rich carbon from biomass wastes for high performance supercapacitors. *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 612, P. 213–222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.12.144>.
11. Guerrero, J. V., Burrow, J. N., Eichler, J. E., Rahman, M. Z., Namireddy, M. V., Friedman, K. A., Coffman, S. S., Calabro, D. C., Mullins, C. B. (2020). Evaluation of two potassium-based activation agents for the production of oxygen- and nitrogen-doped porous carbons. *Energy Fuels*, Vol. 34, Iss. 5, P. 6101–6112. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00427>.
12. Zhang, Y., Peng, J., Feng, G., Presser, V. (2021). Hydration shell energy barrier differences of sub-nanometer carbon pores enable ion sieving and selective ion removal. *Chem. Eng. J.*, Vol. 419, Art. 129438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129438>.
13. Kucherenko, V. A., Tamarkina, Yu. V., Sabierova, V. A. (2020). Formation of the Porous Structure of Fossil Coals upon Alkaline Activation with Thermal Shock. *Solid Fuel Chemistry*, Vol. 54, Iss. 2, P. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0361521920020068>.
14. Kowalczyk, P., Deditius, A., Ela W. P., Wiśniewski, M., Gauden, P. A., Terzyk, A. P., Furmaniak, S., Włoch, J., Kaneko, K., Neimark, A. V. (2018). Super-sieving effect in phenol adsorption from aqueous solutions on nanoporous carbon beads. *Carbon*, Vol. 135, P. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.03.063>.
15. Chen, C., Geng, X., Huang, W. (2017). Adsorption of 4-chlorophenol and aniline by nanosized activated carbons. *Chem. Eng. J.*, Vol. 327, P. 941–952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.183>.
16. Jasri, K., Abdulhameed, A. S., Jawad, A. H., Al Othman, Z. A., Yousef, T. A., Duaij, O. K. (2023). Mesoporous activated carbon produced from mixed wastes of oil palm frond and palm kernel shell using microwave radiation-assisted K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> activation for methylene blue dye
- DOI: <https://doi.org/10.3103/S0361521921020075>.
9. Chmiola J., Yushin G., Gogotsi Y., Portet C., Simon P., Taberna P.L. Anomalous increase in carbon capacitance at pore sizes less than 1 nanometer. *Science*. 2006. Vol. 313, Iss. 5794. P. 1760–1763. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1132195>.
10. Jiang Y., Chen J., Zeng Q., Zou Z., Li J., Zeng L., Sun W., Li C. M. Facile method to produce sub-1 nm pore-rich carbon from biomass wastes for high performance supercapacitors. *J. Colloid Interface Sci.* 2022. Vol. 612. P. 213–222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.12.144>.
11. Guerrero J. V., Burrow J. N., Eichler J. E., Rahman M. Z., Namireddy M. V., Friedman K. A., Coffman S. S., Calabro D. C., Mullins C. B. Evaluation of two potassium-based activation agents for the production of oxygen- and nitrogen-doped porous carbons. *Energy Fuels*. 2020. Vol. 34, Iss. 5. P. 6101–6112. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00427>.
12. Zhang Y., Peng J., Feng G., Presser V. Hydration shell energy barrier differences of sub-nanometer carbon pores enable ion sieving and selective ion removal. *Chem. Eng. J.* 2021. Vol. 419. Art. 129438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129438>.
13. Kucherenko V. A., Tamarkina Yu. V., Sabierova V. A. Formation of the porous structure of fossil coals upon alkaline activation with thermal shock. *Solid Fuel Chemistry*. 2020. Vol. 54, Iss. 2. P. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0361521920020068>.
14. Kowalczyk P., Deditius A., Ela W. P., Wiśniewski M., Gauden P.A., Terzyk A. P., Furmaniak S., Włoch J., Kaneko K., Neimark A. V. Super-sieving effect in phenol adsorption from aqueous solutions on nanoporous carbon beads. *Carbon*. 2018. Vol. 135. P. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.03.063>.
15. Chen C., Geng X., Huang W. Adsorption of 4-chlorophenol and aniline by nanosized activated carbons. *Chem. Eng. J.* 2017. Vol. 327. P. 941–952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.183>.
16. Jasri K., Abdulhameed A. S., Jawad A. H., Al Othman Z. A., Yousef T. A., Duaij O. K. Mesoporous activated carbon produced from mixed wastes of oil palm frond and palm kernel shell using microwave radiation-assisted

- removal: Optimization by response surface methodology. *Diamond and Related Materials*, Vol. 131, Art. 109581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109581>.
17. Ghorbani, M., Seyedin, O., Aghamohammadhassan, M. (2020). Adsorptive removal of lead (II) ion from water and wastewater media using carbon-based nanomaterials as unique sorbents: A review. *Journal of Environmental Management*, Vol. 254, Art. 109814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109814>.
18. Tamarkina, Yu. V., Anishchenko, V. M., Redko, A. M., Kucherenko, V. O. (2020). Adsorbtsiini vlastyvoli vykopnogo vugill'ya, aktyvovanogo gidroksydom kaliyu. Vplyv stupenya metamorfizmu [Adsorption properties of coals activated with potassium hydroxide. Influence of coal rank]. *Khimiya, Phisyka i Tekhnologiya Poverkhni = Chemistry, physics and surface technology*, Vol. 11, Iss. 2, P. 175–189. DOI: <https://doi.org/10.15407/hftp11.02.175> [in Ukrainian].
19. Tamarkina, Yu. V., Anishchenko, V. M., Redko, A. M., Kucherenko, V. O. (2022). Aktyvovane luhom vykopne vugillya. Mikroporysta struktura ta zdatnist adsorbuvaty fenolni spoluky [Alkali activated coals. Microporous structure and capability to adsorb phenol compounds]. *Khimiya, Phisyka i Tekhnologiya Poverkhni = Chemistry, physics and surface technology*, Vol. 13, Iss. 1, P. 111–124. DOI: <https://doi.org/10.15407/hftp13.01.111> [in Ukrainian].
20. Jagiello, J., Olivier J.P. (2013). 2D-NLDFT adsorption models for carbon slit-shaped pores with surface energetical heterogeneity and geometrical corrugation. *Carbon*, Vol. 55, P. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.12.011>.
21. Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., Sing, K. S. W. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.*, Vol. 87, Iss. 9–10, P. 1051–1069. DOI: <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
22. Redko, A. V., Tamarkina, Yu. V., Redko, A. M., Frolova, I. B., Kucherenko, V. O. (2023). Spriamovanist zmin porystoi struktury i adsorbtsiinoi zdatnosti pry topokhimichnomu okysneni aktyvovanoho luhom vykopnogo vugillya [Direction of changes in porous structure and adsorption capacity during topochemical oxidation of alkali-activated fossil coal]. *Pytannya Khimii Khim. Tekhnol. = Questions of chemistry and chemical technology*, No. 2, P. 127–136 [in Ukrainian].
- K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> activation for methylene blue dye removal: Optimization by response surface methodology. *Diamond and Related Materials*. 2023. Vol. 131. Art. 109581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109581>.
17. Ghorbani M., Seyedin O., Aghamohammadhassan M. Adsorptive removal of lead (II) ion from water and wastewater media using carbon-based nanomaterials as unique sorbents: A review. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 254. Art. 109814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109814>.
18. Тамаркіна Ю. В., Аніщенко В. М., Редько А. М., Кучеренко В. О. Адсорбційні властивості виковного вугілля, активованого гідроксидом калію. Вплив ступеня метаморфізму. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2020. Т. 11, № 2. С. 175–189. DOI: <https://doi.org/10.15407/hftp11.02.175>.
19. Тамаркіна Ю. В., Аніщенко В. М., Редько А. М., Кучеренко В. О. Активоване лугом виковне вугілля. Мікропориста структура та здатність адсорбувати фенольні сполуки. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2022. Т. 13, № 1. С. 111–124. DOI: <https://doi.org/10.15407/hftp13.01.111>.
20. Jagiello J., Olivier J. P. 2D-NLDFT adsorption models for carbon slit-shaped pores with surface energetical heterogeneity and geometrical corrugation. *Carbon*. 2013. Vol. 55. P. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.12.011>.
21. Thommes M., Kaneko K., Neimark A. V., Olivier J. P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K. S. W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* 2015. Vol. 87. Iss. 9–10. P. 1051–1069. DOI: <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
22. Редько А. В., Тамаркіна Ю. В., Редько А. М., Фролова І. Б., Кучеренко В. О. Спрямованість змін пористої структури і адсорбційної здатності при топохімічному окисненні активованого лугом виковного вугілля. *Питання хімії та хімічної технології*. 2023. № 2. Р. 127–136.

23. Revellame, E. D., Fortela, D. L., Sharp, W., Zappi, M. E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, Vol. 1, Art. 100032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>.
24. Wang, J., Guo, X. (2022). Rethinking of the intraparticle diffusion adsorption kinetics model: Interpretation, solving methods and applications. *Chemosphere*, Vol. 309, Art. 136732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136732>.
25. Al-Ghouti, M. A., Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 393, Art. 122383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>.
26. Ahmed, M. J., Theydan, S. K. (2013). Adsorption of p-chlorophenol onto microporous activated carbon from Albizia lebeck seed pods by one-step microwave assisted activation. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, Vol. 100, P. 253–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.01.008>.
27. Mbarki, F., Selmi, T., Kesraoui, A., Seffen, M. (2022). Low-cost activated carbon preparation from Corn stigmata fibers chemically activated using H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ZnCl<sub>2</sub> and KOH: Study of methylene blue adsorption, stochastic isotherm and fractal kinetic. *Industrial Crops and Products*, Vol. 178, Art. 114546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114546>.
28. Ghorbani, M., Seyedin, O., Aghamohammadhassan, M. (2020). Adsorptive removal of lead (II) ion from water and wastewater media using carbon-based nanomaterials as unique sorbents: A review. *Journal of Environmental Management*, Vol. 254, Art. 109814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109814>.
29. Wu, F.-C., Wu, P.-H., Tseng, R.-L., Juang, R.-S. (2011). Preparation of novel activated carbons from H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-pretreated corncob hulls with KOH activation for quick adsorption of dye and 4-chlorophenol. *J. Environ. Manage.*, Vol. 92, Iss. 3, P. 708–713. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.003>.
30. Mahadevi, A. S., Sastry, G. N. (2013). Cation- $\pi$  Interaction: Its Role and Relevance in Chemistry, Biology, and Material Science. *Chem. Rev.*, Vol. 113, Iss. 3, P. 2100–2138. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr300222d>.
23. Revellame E. D., Fortela D. L., Sharp W., Zappi M. E. Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2020. Vol. 1. Art.100032. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>.
24. Wang J., Guo X. Rethinking of the intraparticle diffusion adsorption kinetics model: Interpretation, solving methods and applications. *Chemosphere*. 2022. Vol. 309. Art. 136732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136732>.
25. Al-Ghouti M. A., Da'ana D. A. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393. Art. 122383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>.
26. Ahmed M. J., Theydan S. K. Adsorption of p-chlorophenol onto microporous activated carbon =from Albizia lebeck seed pods by one-step microwave assisted activation. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2013. Vol. 100. P. 253–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.01.008>.
27. Mbarki F., Selmi T., Kesraoui A., Seffen M. Low-cost activated carbon preparation from Corn stigmata fibers chemically activated using H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ZnCl<sub>2</sub> and KOH: Study of methylene blue adsorption, stochastic isotherm and fractal kinetic. *Industrial Crops and Products*. 2022. Vol. 178. Art. 114546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114546>.
28. Ghorbani M., Seyedin O., Aghamohammadhassan M. Adsorptive removal of lead (II) ion from water and wastewater media using carbon-based nanomaterials as unique sorbents: A review. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 254. Art. 109814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109814>.
29. Wu F.-C., Wu P.-H., Tseng R.-L., Juang R.-S. Preparation of novel activated carbons from H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-pretreated corncob hulls with KOH activation for quick adsorption of dye and 4-chlorophenol. *J. Environ. Manage.* 2011. Vol. 92, Iss. 3. P. 708–713. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.10.003>.
30. Mahadevi A. S., Sastry G. N. Cation- $\pi$  Interaction: Its Role and Relevance in Chemistry, Biology, and Material Science. *Chem. Rev.* 2013. Vol. 113, Iss. 3. P. 2100–2138. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr300222d>.

**SABIEROVA VIKTORIIA**

PhD, Junior Researcher,  
Department of Coal Chemistry,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and  
Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3780-1405>  
Scopus Author ID: 57195471876  
Researcher ID: AAF-1472-2020  
E-mail: [victoria.bondaletova@gmail.com](mailto:victoria.bondaletova@gmail.com)

**REDKO ANASTASIIA**

Leading engineer,  
Department of Coal Chemistry,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and  
Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<http://orcid.org/0000-0001-9768-4020>  
Scopus Author ID: 58503199300  
Researcher ID: AEC-1721-2022  
E-mail: [redkoav0@gmail.com](mailto:redkoav0@gmail.com)

**TAMARKINA YULIIA**

PhD, Senior Researcher,  
Department of Investigation of Nucleophilic Reactions,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and  
Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<http://orcid.org/0000-0002-8747-4481>  
Scopus Author ID: 6507643028  
Researcher ID: AAF-1498-2020  
E-mail: [ytamarkina@gmail.com](mailto:ytamarkina@gmail.com)

**KUCHERENKO VOLODYMYR**

Head of the Department of Coal Chemistry, PhD Hab,  
Leading Researcher, Department of Coal Chemistry,  
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and  
Coal Chemistry of the National Academy  
of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
<http://orcid.org/0000-0001-7234-947X>  
Scopus Author ID: 7005252259  
Researcher ID: AAE-1193-2020  
E-mail: [V.O.Kucherenko@nas.gov.ua](mailto:V.O.Kucherenko@nas.gov.ua)

**SABIEROVA V. O., TAMARKINA Yu. V., REDKO A. V., KUCHERENKO V. O.**

L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry  
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

**ADSORPTION PROPERTIES OF NANOPOROUS CARBON MATERIALS OBTAINED  
BY ALKALINE ACTIVATION WITH THERMAL SHOCK**

**Purpose.** Investigation of the adsorption activity of nanoporous carbon materials (NCMs) prepared by alkali activation with thermal shock.

**Methodology.** The porosity characteristics of NCMs were calculated according to isotherms of low-temperature (77 K) adsorption and desorption of nitrogen (2D-NLDFT-HS method). Adsorption measurements were performed at 25°C and a constant content of NCM (1 g/l) in aqueous solutions. Adsorption kinetics data were calculated by the 1st and 2nd order models and intraparticle diffusion. Adsorption isotherms are approximated by Langmuir and Freundlich models.

**Findings.** It was studied the adsorption kinetics of phenol (Ph), 4-chlorophenol (CPh), methylene blue (MB) and lead cations by NCMs formed from brown coal (NCM(B)) and long-flame coal (NCM(D)) in a new process – alkaline activation with thermal shock. Kinetic data were obtained at the same initial concentration of adsorbates (5.0 mmol/l). The adsorption equilibrium was found to achieve for 2-4 hours depending on the adsorbate. The kinetics of adsorption obeys the second-order equation, and the maximum adsorption capacities increase in the series  $Pb(II) < MB < \Phi < X\Phi$  and are in the range of 0.736–3.350 mmol/g for NCM(B) and 1.097–4.359 mmol/g for NCM(D). The adsorption rate is limited by the interaction of molecules with surface adsorption centers, and not by diffusion into the NCM nanoporous structure. The initial adsorption rate is highest for the adsorption of CPh (1.672 and 2.050 mmol/g·min), the lowest for the adsorption of MB (0.062 and 0.075 mmol/g·min). During the first minute, about half of the maximum amount of CPh is adsorbed. Adsorption isotherms were found to be approximated by the Langmuir ( $R^2 = 0.981-0.994$ ) and Freundlich ( $R^2 = 0.986-0.998$ ) models with a close errors. The capacities of saturated layers of adsorbates calculated from the Langmuir model increase in the same order as the maximum adsorption capacities. The Freundlich model, which assumes a chemically inhomogeneous adsorbent surface, is better applicable. This is probably a consequence of the fact that the chemical structure of NCM adsorption centers is more diverse due to the «explosive» formation of volatile products during thermal shock. A comparison of the adsorption parameters of the obtained NCMs with literature data allows us to evaluate the synthesized materials as effective adsorbents for purifying aqueous media from pollutants and toxic compounds.

**Originality.** For the first time, the adsorption of phenol, 4-chlorophenol, methylene blue dye and lead cations by NCMs samples formed from brown and long-flame coals under alkaline activation with thermal shock.

**Practical value.** The obtained results make it possible to evaluate the practical prospects of NCMs as adsorption materials for the purification of aquatic environments from ecotoxicants.

**Keywords:** nanoporous carbon materials; adsorption; phenolic compounds; methylene blue; lead cations.

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.4.12>

УДК 66.098:  
546.11

<sup>1</sup>ШВЕДЧИКОВА І. О., <sup>1</sup>ПАНАСЮК І. В.,  
<sup>2</sup>СОЛОШИЧ І. О., <sup>1</sup>МАЛИЙ Я. С.

<sup>1</sup>Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

<sup>2</sup>Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,  
Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЯК ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**Мета.** Розроблення методичних рекомендацій для проведення лабораторних (практичних) занять з дослідження електричних характеристик паливних елементів для використання в навчальному процесі підготовки здобувачів за різними рівнями вищої освіти та освітніми програмами.

**Методика.** Передбачає обробку експериментальних даних, отриманих під час проведення досліджень, та виявлення закономірностей щодо впливу таких факторів, як концентрація та температура розчину етанолу, на енергетичні характеристики паливного елемента типу Мікро-DEFC.

**Результати.** Розроблено методичні рекомендації до виконання практичних (лабораторних) робіт, присвячених дослідженню фізичних властивостей етанолового паливного елемента. Наведено тестові результати, отримані під час проведення експерименту з визначення впливу концентрації етанолу на енергетичні характеристики паливного елемента. Показано, що методичні рекомендації мають універсальний характер та адаптовані до можливостей та потреб здобувачів, які навчаються за різними освітніми програмами та рівнями підготовки: перший (бакалаврський) та другий (магістерський).

**Наукова новизна.** З використанням експериментального зразка Horizon FCJJ-22 Fuel Cell типу Мікро-DEFC розроблені методичні рекомендації дослідницької спрямованості для здобувачів, що навчаються за різними освітніми програмами, структура яких охоплює розгляд теоретичних питань, зокрема ознайомлення з хімічними реакціями на електродах паливного елемента, а також проведення експериментальних досліджень з визначення впливу низки факторів на електричні характеристики паливного елемента.

**Практична значимість.** Розроблені методичні рекомендації з дослідження фізичних властивостей етанолових паливних елементів призначені для використання під час проведення лабораторних та/або практичних занять зі здобувачами вищої освіти, які навчаються за різними спеціальностями та освітніми програмами. Отримані під час таких занять знання та навички стануть основою для розширення у здобувачів власних знань про нові технології в області альтернативної енергетики.

**Ключові слова:** альтернативна енергетика; відновлювані джерела енергії; екологічний транспорт; інновація; паливний елемент; гібридна система електроживлення; фізичний експеримент.

**Вступ.** На сьогодні практично усі процеси, від яких залежить існування людства, потребують енергетичних затрат. Стрімкий розвиток техніки, постійно зростаюча вартість енергоресурсів потребують пошуку альтернативної заміни традиційних джерел енергії. В Україні, енергетика якої потерпає від руйнувань через обстріли енергетичної інфраструктури, що призводить до знеструмлення споживачів, розвиток відновлюваних жерел енергії (ВДЕ) та розподіленої генерації виступає запорукою зміцнення енергетичної безпеки країни.

Одним із інноваційних напрямів у галузі альтернативної енергетики є використання паливних елементів (ПЕ) – хімічних джерел струму, які здійснюють «...пряме перетворення енергії палива в електричну енергію, минаючи малоефективні, що йдуть з великими втратами, процеси горіння» [1]. ПЕ працюють на основі метанолу (етанолу) або водню, екологічно безпечні, мають високу енергетичну потужність, низьку емісію шкідливих речовин та

можливість отримання зі вторинної сировини. Інноваційні розробки ПЕ надають широкий простір для використання нових матеріалів, каталізаторів та оптимізації процесів, що забезпечують їх ефективну роботу. Тому дослідження фізичних властивостей ПЕ, за яких досягається максимальна ефективність їх роботи як джерел енергії, є актуальною науково-технічною задачею. Актуальність теми дослідження обумовлена також зростаючим інтересом до електромобільних транспортних засобів на ПЕ, які сприяють розвитку екологічно чистої транспортної системи.

**Аналіз попередніх досліджень.** До основних типів ПЕ відносять [1]: на твердому оксидному електроліті (Solid Oxid Fuel Cell (SOFC)); на основі розплавленого карбонату (Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)); з прямим окисненням метанолу (Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)) або етанолу (Direct Ethanol Fuel Cell (DEFC)); на основі фосфорної кислоти (Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)); лужний ПЕ (Alkaline Fuel Cell (AFC)); з протонно-обмінною мембраною (Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)).

На сьогодні відомі декілька напрямків використання ПЕ в системах електроживлення. В більшості випадків вони використовуються як додаткове джерело живлення у складі гібридних (комбінованих) енергетичних систем локальних об'єктів невеликої потужності. Так, в [2] представлений опис водневої паливної комірки як елемента комбінованого джерела електричної енергії для живлення житлового приміщення. Відзначається, що однією з найважливіших переваг водневих паливних комірок є те, що вони використовують водень, який, в свою чергу, може бути отриманий в результаті електролізу за рахунок надлишкової електроенергії у певний період часу, а у піки споживання електроенергії може генеруватися паливною коміркою.

В роботі [2] досліджується гібридна енергетична система, яка складається з фотоелектричної батареї (PV), вітрової турбіни (WT), паливного елемента (FC), водяного електролізера, бака водню як системи зберігання енергії та інвертора. Для конфігурації PV/WT/FC, що працює автономно або підключена до мережі, було встановлено, що ПЕ забезпечує високу якість перетворення енергії та є зручним в обслуговуванні. Основними компонентами ПЕ є два активних електроди: анод, катод окиснювача та електроліт між ними, який пропускає лише іони. Відзначається, що загальний принцип роботи різних ПЕ схожий, а основні відмінності полягають у типі електроліту та робочій температурі.

В роботі [3] продемонстровано модель сонячної фотоелектричної станції, яка враховує динаміку системи електролізу водневого ПЕ та можливість додавання екологічних обмежень для забезпечення використання ВДЕ. Оптимальна модель диспетчеризації, представлена в цій статті, служить для планування роботи фотоелектричних установок у режимі власного споживання. Якщо генерація ВДЕ, менша за попит на навантаження, то енергія, що зберігається в баках для водню, подається на ПЕ для перетворення її в електричну енергію, яка обслуговує навантаження. Коли надлишкова енергія від ВДЕ перевищує енергію, необхідну для повного заряджання водневих резервуарів – надлишок енергії подається в мережу.

Таким чином, ПЕ знаходять все більше застосування в якості додаткового (резервного) джерела енергії в гібридних системах з ВДЕ для електроживлення локальних об'єктів, які функціонують автономно або підключені до мережі.

За останнє десятиліття було проведено ряд досліджень різних технологій ПЕ в системі електромобіля [5–9], що обумовлене швидким інноваційним розвитком екологічно безпечного транспорту. Вважається, що транспортні засоби на водневих ПЕ заправляються так само швидко, як і автомобілі на викопному пальному, і мають аналогічну дальність проїзду [10]. В [8] показано, що ПЕ підходять для застосування на навантажувачах, авіатранспортних та морських транспортних засобах. Перевагами таких транспортних засобів є швидкий час заряджання, безшумна робота, великий запас ходу, низькі викиди вуглецю.

В [11] представлений огляд електромобілей на ПЕ (FCEV), їх принцип роботи, різні топології FCEV, схеми управління енергією та технічні проблеми, з якими вони стикаються. Розглянуто типи двигунів, що використовуються в FCEV. В [7] відмічається, що використання ПЕ в електричних транспортних засобах швидко зростає і стане альтернативою традиційним транспортним засобам у майбутньому. Основні зусилля вчених спрямовані на те, щоб електромобілі на ПЕ мали достатню продуктивність для щоденних транспортних потреб.

Розширення областей застосування ВДЕ, стрімкі зміни в технологіях виготовлення ПЕ впливають на освітню діяльність закладів вищої освіти. В роботі [12] вже проведений аналіз впливу технологічних змін, які відбуваються в умовах зеленого енергетичного переходу, на освітні програми (ОП) підготовки фахівців з електричної інженерії. У той самий час ці зміни впливають на більш широке коло галузей знань. В цих умовах актуалізуються питання оновлення змісту навчальних дисциплін та розроблення сучасного методичного забезпечення, адаптованого до можливостей та потреб здобувачів різних галузей знань.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення методичних рекомендацій до проведення лабораторних (практичних) занять з дослідження фізичних властивостей паливних елементів для використання в навчальному процесі підготовки здобувачів за різними рівнями вищої освіти та освітніми програмами.

**Результати дослідження.** Як зазначено вище, сучасні технологічні зміни в енергетиці, зокрема інноваційні розробки в області ПЕ, впливають на зміст навчальних дисциплін майбутніх фахівців різних спеціальностей. Так, в Київському національному університеті технологій та дизайну (КНУТД) і Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського (КрНУ) започатковані ОП, тематика навчальних дисциплін яких передбачає ознайомлення з властивостями ПЕ (табл. 1).

Таблиця 1

**Освітні програми та навчальні дисципліни,  
тематика яких передбачає ознайомлення з ПЕ**

Рівень/ступінь вищої освіти	Спеціальність/Назва ОП	Навчальні дисципліни
Перший (бакалаврський)/ Бакалавр	141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ ОП «Електромеханіка» (КНУТД)	Інноваційні технології електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
	275 «Транспортні технології (за видами)»/ ОП «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» (КрНУ)	Транспортна екологія
Другий (магістерський)/ Магістр	183 «Технології захисту навколишнього середовища»/ ОП «Екологічна безпека» (КрНУ)	Інноваційна діяльність у сфері екології

Зміст дисципліни «Інноваційні технології електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» включає тему «Паливні елементи», яка охоплює такі питання, як призначення ПЕ; принцип дії та різновиди ПЕ; приклади використання ПЕ в електроенергетиці та електроніці.

До навчальної дисципліни «Транспортна екологія» додана тема, присвячена електромобільності, в межах якої поряд із класичною схемою електромобіля розглядаються принципи побудови електромобілей із застосування ПЕ.

Навчальна дисципліни «Інноваційна діяльність у сфері екології» за своїм змістом спрямована на вивчення процесів екологізації підприємств, у тому числі за рахунок переходу

на отримання енергії з альтернативних джерел, серед яких ПЕ розглядаються як одне з найбільш перспективних ВДЕ.

З урахуванням зазначеного вище авторами статті розроблені методичні рекомендації для проведення лабораторних (практичних) занять з дослідження електричних характеристик ПЕ, особливістю яких є їх адаптивність, тобто можливість використання в навчальному процесі підготовки здобувачів за різними рівнями вищої освіти та ОП (табл. 1).

Розглянемо більш детально порядок та особливості виконання експериментальної роботи на тему «Паливний елемент прямого етанолу типу DEFC». Огляд інформаційних джерел показав, що ПЕ, який використовує водень як паливо, має високу продуктивність, але потребує високого ступеня чистоти та дорогих електродів з платини. З огляду на це, для дослідження обраний ПЕ з прямим етанолом з протоніообмінною мембраною типу DEFC (Direct Ethanol Fuel Cell).

Перевагою DEFC у порівнянні з водневими елементами з протоніообмінною мембраною є можливість використання етанолу в рідкому вигляді, який більш вигідний для збереження та транспортування, ніж водень. На відміну від інших технологій, в яких використовується рідина замість газу, в DEFC немає необхідності в застосуванні зовнішнього конвертора для отримання чистого водню [13]. Перевагою етанолу перед метанолом є його низька токсичність та можливість виробництва з біомаси. Так, етаноловий паливний елемент DEFC може вироблятися з харчових культур (цукрової тростини, кукурудзи, буряка), неїстівних частин харчових рослин або з біомаси тополі, лісових відходів [14].

Метою дослідження під час лабораторного (практичного) заняття є ознайомлення з теоретичними відомостями стосовно ПЕ типу DEFC та експериментальне вивчення впливу концентрації та температури розчину етанолу на робочі характеристики ПЕ, зокрема напругу, що генерується ПЕ, та електричну потужність.

При проведенні експериментальних досліджень щодо впливу концентрації та температури розчину етанолу на фізичні властивості ПЕ використовується експериментальний зразок Horizon FCJJ-22 Fuel Cell типу Мікро-DEFC (рис. 1, а), а також додаткове обладнання (рис. 2): мультиметр, лабораторний термометр, ваги, дріт з кліпсами, скляний посуд об'ємом 100 мл для змішування рідких речовин (етаноловий або метиловий спирт, дистильована вода), а також кубики льоду для охолодження рідини. Розчин етанолу завантажується до контейнеру експериментального зразка (рис. 1, б).

На початковому етапі виконання дослідження здобувачі мають ознайомитися з теоретичними відомостями, зокрема з принципом дії ПЕ та хімічними реакціями на його електродах [15]:

Загальна реакція:  $C_2H_5OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$ .

Реакція на аноді:  $C_2H_5OH + 3H_2O \rightarrow 2CO_2 + 12H^+ + 12e^-$ .

Реакція на катоді:  $3O_2 + 12H^+ + 12e^- \rightarrow 3H_2O$ .

За певних умов реакція припиняється з утворенням оцтової кислоти наступним чином:  $C_2H_5OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 4H^+ + 4e^-$ . На рис. 2 наведена принципова схема спиртового кисневого ПЕ [15, 16].

Дослідження впливу концентрації етанолу на енергетичні характеристики – струм, напругу та електричну потужність у вихідному колі ПЕ, проводиться за наступних значень концентрації етанолу: 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15%. Осереднені результати тестового експерименту наведені в табл. 2, з яких видно, що зі збільшенням концентрацій етанолу за об'ємом напруга та потужність ПЕ швидко зростають, але потім показники поступово падають. Якщо концентрація етанолу менше 3 мл або більше 15 мл у 60 мл води, то ПЕ виробляє невеликі значення напруги та потужності, які неможливо виміряти. Зі збільшенням концентрації етанолу за об'ємом, концентрація реагентів у місцях реакції збільшується, тому електрохімічна швидкість також зростає, але коли вона досягає точки насичення,

продуктивність поступово падає. Встановлено, що максимальна продуктивність ПЕ досягається при співвідношенні 7 мл етанолу на 60 мл води.

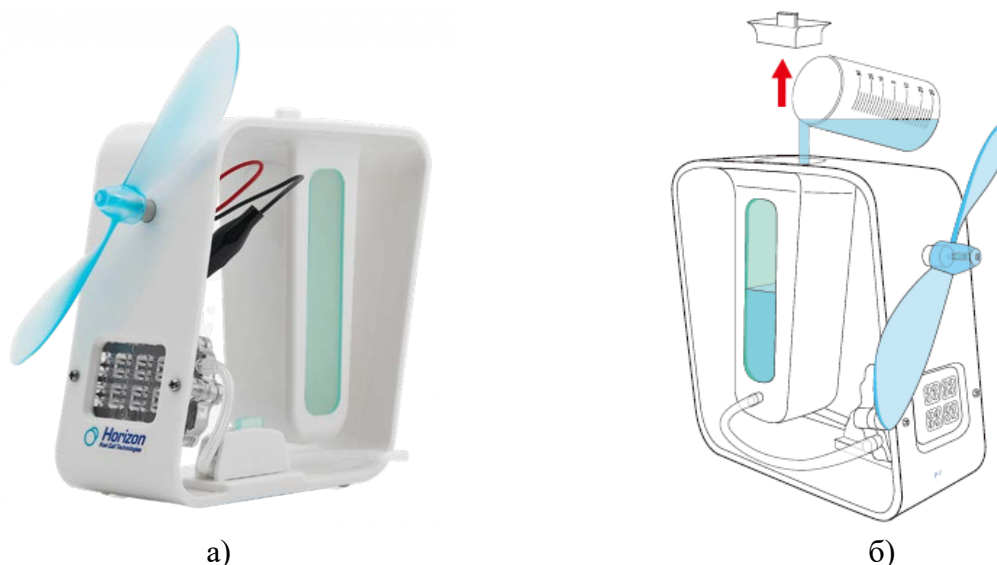


Рис. 1. Експериментальний зразок Horizon FCJJ-22 Fuel Cell:  
 а) загальний вигляд; б) заповнення контейнеру зразка розчином етанолу

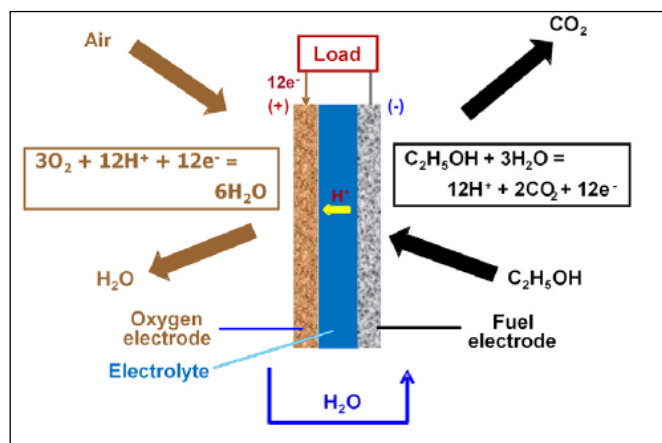


Рис. 2. Принципова схема спиртово-кисневого ПЕ

Таблиця 2

Середні дані результатів експериментального дослідження впливу концентрації етанолу на продуктивність ПЕ

Концентрація етанолу, %	Сила струму, $I$ , А	Напруга, $U$ , В	Потужність, $P$ , Вт
3	10,872	0,669	7,2874
5	11,715	0,662	7,7563
7	17,195	0,757	13,0473
9	15,701	0,747	11,7573
11	15,702	0,723	11,3702
13	15,482	0,733	11,3638
15	16,299	0,705	11,5263

Вивчення впливу зміни робочої температури на продуктивність виробництва електроенергії ПЕ здійснюється при концентрації етанолу 5–7% для робочих температур 10,

15 та 20°C. Для охолодження рідини використовуються кубики льоду. Під час експерименту здобувачі мають підтвердити тенденцію до зростання числових значень енергетичних характеристик із збільшенням температури.

Таким чином, під час досліджень фізичних властивостей ПЕ у відповідності до розроблених методичних рекомендацій здобувачі різних спеціальностей вчаться застосовувати знання у практичних ситуаціях та розширюють власні знання про нові технології в області альтернативної енергетики.

**Висновки.** В роботі показано, що ПЕ знаходять все більше застосування в якості додаткового (резервного) джерела енергії в гібридних системах з ВДЕ для електроживлення локальних об'єктів та в системах електромобілів. Стрімкі зміни в технологіях виготовлення ПЕ впливають на освітню діяльність закладів вищої освіти, що знаходить відображення в змісті ОП різних спеціальностей. З огляду на це, в роботі запропоновані методичні рекомендації з дослідження фізичних властивостей ПЕ, які, завдяки їх універсальності, можуть використовуватися в навчальному процесі підготовки здобувачів за різними рівнями вищої освіти та ОП.

В розроблених методичних рекомендаціях передбачається визначення концентрації етанолу, за якою досягається максимальна ефективність роботи ПЕ типу Мікро-DEFC, а також дослідження впливу температури на енергетичні характеристики ПЕ. Під час досліджень використовується кспериментальний зразок ПЕ типу Horizon FCJJ-22 Fuel Cell та інше додаткове обладнання.

Перспективи подальших досліджень полягають у проведенні апробації розроблених методичних рекомендацій та у визначенні ступеню результативності виконання завдань здобувачами різних спеціальностей.

## References

## Література

1. Kuzminskyi, E. V., Shchurska, K. O., Samarukha, I. A. (2017). Palyvni elementi [Fuel cells]. *Sychniy stan rozroblenya. Vidnovluvalna energetika = Current state of development. Renewable energy*, № 1, P. 90–96. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien\\_2013\\_1\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2013_1_18) [in Ukrainian].
1. Кузмінський Є. В., Щурська К. О., Самаруха І. А. Паливні елементи. *Сучасний стан розроблення. Відновлювана енергетика*. 2017. № 1. С. 90–96. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien\\_2013\\_1\\_18](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2013_1_18).
2. Palchyk, O. A. (2011). Modeluvannya avtonomnogo djerela jivlenya na bazi palyvni elementiv [Modeling of an autonomous power source based on fuel cells]. *Energetika i avtomatika = Energy and automation*, № 2 (8), P. 22–30 [in Ukrainian].
2. Пальчик О. А. Моделювання автономного джерела живлення на базі паливних елементів. *Енергетика і автоматика*. 2011. № 2 (8). С. 22–30.
3. Sultan, H. M., Menesy, A. S., Kamel, S., Korashy, A., Almohaimeed, S. A., Abdel-Akher, M. (2021). An improved artificial ecosystem optimization algorithm for optimal configuration of a hybrid PV/WT/FC energy system. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, P. 1001–1025.
3. Sultan H. M., Menesy A. S., Kamel S., Korashy A., Almohaimeed S. A., Abdel-Akher M. An improved artificial ecosystem optimization algorithm for optimal configuration of a hybrid PV/WT/FC energy system. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. P. 1001–1025.
4. Matute, G., Yusta, J. M., Beyza, J., Monteiro, C. (2022). Optimal dispatch model for PV-electrolysis plants in self-consumption regime to produce green hydrogen: A Spanish case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, P. 25202–25213.
4. Matute G., Yusta J. M., Beyza J., Monteiro C. Optimal dispatch model for PV-electrolysis plants in self-consumption regime to produce green hydrogen: A Spanish case study. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. P. 25202–25213.
5. Trimm, D. L., Onsan, Z. I. (2001). Onboard fuel conversion for hydrogen-fuel-cell-driven vehicles. *Catalysis Reviews*, Vol. 43 (1–2), P. 31–84.
5. Trimm D. L., Onsan Z. I. Onboard fuel conversion for hydrogen-fuel-cell-driven vehicles. *Catalysis Reviews*. 2001. Vol. 43 (1–2). P. 31–84.

6. Chaitanya, S. R., Siva Kumar, J. S. V., Rambabau, M. (2014). Fuel cell supplied SVPWM controlled inverter fed PMSM drive in an electrical vehicle. *International Journal of Engineering Research and Technology* (IJERT), Vol. 3, No. 9, P. 806–812. URL: <https://www.ijert.org/research/fuel-cell-supplied-svpwm-controlled-inverter-fed-pmsm-drive-in-an-electrical-vehicle-IJERTV3IS090599.pdf>.
7. Inci, M., Büyük, M., Demir, M. H., İlbey, G. (2021). A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 137. 110648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648>.
8. Weyers, C., Bocklisch, T. (2018). Simulation-based investigation of energy management concepts for fuel cell—battery—hybrid energy systems in mobile applications. *Energy Procedia*, No. 155, P. 295–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.048>.
9. Robledo, C. B., Oldenbroek, V., Abbruzzese, F. et al. (2018). Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and a residential building. *Applied Energy*, No. 215, P. 615–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.038>.
10. Hydrogen cars won't overtake electric vehicles because they're hampered by the laws of science. Published: June 3, 2020. URL: <https://theconversation.com/hydrogen-cars-wont-overtake-electric-vehicles-because-theyre-hampered-by-the-laws-of-science-139899>.
11. Mitra, U., Arya, A., Gupta, S., Gupta, A. K. (2022). A Brief Overview on Fuel Cell Electric Vehicles. 2022 *International Conference on Emerging Trends in Engineering and Medical Sciences* (ICETEMS), Nagpur, India, 2022, pp. 124–129, DOI: 10.1109/ICETEMS56252.2022.10093428.
12. Shvedchykova, I. O., Panasiuk, I. V., Demishonkova, S. A., Statsenko, D. V. (2024). Osoblyvosti pidhotovky maibutnix fakhivtsiv z elektrychnoi inzhenerii v umovakh zelenoho perekhodu [Features of the training of future specialists in electrical engineering in the conditions of the green transition]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and engineering*, № 2 (19), P. 68–78, DOI: 10.30857/2786-5371.2024.2.7 [in Ukrainian].
13. Wongyao, N., Therthianwong, A., Therthianwong, S. (2023). Performance of direct alcohol fuel cells fed with
6. Chaitanya S. R., Siva Kumar J. S. V., Rambabau M. Fuel cell supplied SVPWM controlled inverter fed PMSM drive in an electrical vehicle. *International Journal of Engineering Research and Technology* (IJERT). 2014. Vol. 3, No. 9. P. 806–812. URL: <https://www.ijert.org/research/fuel-cell-supplied-svpwm-controlled-inverter-fed-pmsm-drive-in-an-electrical-vehicle-IJERTV3IS090599.pdf>.
7. Inci M., Büyük M., Demir M. H., İlbey G. A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 137. 110648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648>.
8. Weyers C., Bocklisch T. Simulation-based investigation of energy management concepts for fuel cell—battery—hybrid energy systems in mobile applications. *Energy Procedia*. 2018. No. 155. P. 295–308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.048>.
9. Robledo C. B., Oldenbroek V., Abbruzzese F. et al. Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and a residential building. *Applied Energy*. 2018. No. 215. P. 615–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.038>.
10. Hydrogen cars won't overtake electric vehicles because they're hampered by the laws of science. Published: June 3, 2020. URL: <https://theconversation.com/hydrogen-cars-wont-overtake-electric-vehicles-because-theyre-hampered-by-the-laws-of-science-139899>.
11. Mitra U., Arya A., Gupta S., Gupta A. K. A brief overview on fuel cell electric vehicles. 2022 *International Conference on Emerging Trends in Engineering and Medical Sciences* (ICETEMS), Nagpur, India, 2022. P. 124–129, DOI: 10.1109/icetems56252.2022.10093428.
12. Шведчикова І. О., Панасюк І. В., Демішонкова С. А., Стаценко Д. В. Особливості підготовки майбутніх фахівців з електричної інженерії в умовах зеленого переходу. *Технології та інжиніринг*. 2024. № 2 (19). С. 68–78. DOI: 10.30857/2786-5371.2024.2.7.
13. Wongyao N., Therthianwong A., Therthianwong S. Performance of direct alcohol

- mixed methanol/ethanol solutions. *Energy Convers Manage*, 2023, P. 76-81.
14. Rol vodnyu ta palyvni elementiv y svitoviy energetichniy sistemy [The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system]. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee01157e#!divAbstract> [in Ukrainian].
15. Cherkasov, I., Kravchenko, O. (2020). Electrohimichna charakteristika etanolovih palyvni elementiv z riznymy catalysatoramy [Electrochemical characteristics of ethanol fuel cells with different catalysts]. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen = Journal of physical research*, Vol. 1, P. 56–61 [in Ukrainian].
16. Golovko, N. V. (2014). Phyichni osnovi palyvni elementiv ta perspektiva yikh vikorystannya [Physical foundations of fuel cells and prospects for their use]. *Physico-matematichna osvita = Physical and mathematical education*, № 1 (6), P. 104–110 [in Ukrainian].
- fuel cells fed with mixed methanol/ethanol solutions. *Energy Convers Manage*. 2023. P. 76–81.
14. Роль водню та паливних елементів у світовій енергетичній системі. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c8ee01157e#!divAbstract>.
15. Черкасов І., Кравченко О. Електрохімічна характеристика етанолових паливних елементів з різними каталізаторами. *Журнал фізичних досліджень*. 2020. Вип. 1. С. 56–61.
16. Головка Н. В. Фізичні основи паливних елементів та перспективи їх використання. *Фізико-математична освіта*. 2014. № 1 (6). С. 104–110.

**SHVEDCHYKOVA IRYNA**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Computer Engineering  
and Electromechanics,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3005-7385>  
Scopus ID: 6503887672  
Researcher ID: O-2765-2018  
E-mail: [shvedchykova.io@knuud.edu.ua](mailto:shvedchykova.io@knuud.edu.ua)

**SOLOSHYCH IRYNA**

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,  
Department of Ecology and Biotechnologies,  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National  
University, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-8842-5120>  
Scopus ID: 56437747500  
Researcher ID: ABE-2607-2021  
E-mail: [soloishych@gmail.com](mailto:soloishych@gmail.com)

**PANASIUK IGOR**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Computer Engineering  
and Electromechanics,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0001-6671-4266>  
Scopus ID: 57219251131  
Researcher ID: D-4255-2017  
E-mail: [panasjuk@knuud.edu.ua](mailto:panasjuk@knuud.edu.ua)

**MALYI YAROSLAV**

PhD student,  
Department of Computer Engineering  
and Electromechanics,  
Kyiv National University of Technologies  
and Design, Ukraine  
E-mail: [varikmaly2899@ukr.net](mailto:varikmaly2899@ukr.net)

<sup>1</sup>SHVEDCHYKOVA I. O., <sup>1</sup>PANASIUK I. V., <sup>2</sup>SOLOSHYCH I. O., <sup>1</sup>MALYI Ya. S.

<sup>1</sup>Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<sup>2</sup>Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine

**RESEARCH OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF FUEL ELEMENTS  
AS A POWER SOURCE FOR THE INNOVATIVE DEVELOPMENT  
OF ENVIRONMENTALLY SAFE TRANSPORT**

**Purpose.** Development of methodological recommendations for conducting laboratory (practical) classes on the study of physical properties of fuel cells for use in the educational process of training applicants at various levels of higher education and in various educational programs.

**Methodology.** It involves processing experimental data obtained during research and identifying regularities regarding the influence of such factors as the concentration and temperature of the ethanol solution on the energy characteristics of the Micro-DEFS type fuel cell.

**Findings.** Methodical recommendations for performing practical (laboratory) works dedicated to studying the physical properties of ethanol fuel cells have been developed. Test results obtained during an experiment to determine the effect of ethanol concentration on the energy characteristics of an ethanol fuel cell are presented. It is shown that methodological recommendations have a universal character and are adapted to the capabilities and needs of applicants studying at different educational programs and levels of training: first (bachelor's) and second (master's).

**Originality.** With the use of an experimental sample of Horizon FCJJ-22 Fuel Cell type Micro-DEFS, methodological recommendations of a research orientation have been developed for applicants studying in various educational programs, the structure of which includes consideration of theoretical issues, in particular familiarisation with chemical reactions at the electrodes of a fuel cell, as well as conducting experimental studies to determine the influence of several factors on the operating characteristics of the fuel cell.

**Practical value.** The developed methodological recommendations for the study of the physical properties of ethanol fuel cells are intended for use during laboratory and/or practical classes with students of higher education who will study in various specialities and educational programs. The knowledge and skills acquired during such courses will become the basis for expanding the students' knowledge about new technologies in the field of alternative energy.

**Keywords:** alternative energy; renewable energy sources; ecological transport; experiment; innovation; fuel cell; hybrid power supply system; physical experiment.

«Технології та інжиніринг» – це рецензований журнал з відкритим доступом, який публікує оригінальні дослідження, оглядові статті та технічні нотатки авторів з різних країн. Зосереджуючись на аспектах пов'язаних з розвитком легкої промисловості та споріднених і суміжних галузей, журнал надає платформу для дослідників, науковців, інженерів та фахівців галузі, щоб зробити свій внесок у розвиток знань та розуміння у цих галузях. Основна мета журналу «Технології та інжиніринг» – сприяти міждисциплінарним дослідженням і співпраці, об'єднуючи досвід з різних дисциплін, таких як інформаційні технології, електроніка, комп'ютерно-інтегровані технології та системи управління, технології виробництва текстилю, а також хімічні технології.

## ЦІЛІ ТА ПРОБЛЕМАТИКА

«Технології та інжиніринг» – це рецензований журнал з відкритим доступом, який публікує оригінальні дослідження, оглядові статті та технічні нотатки, що висвітлюють найбільш значущі розробки в галузі легкої промисловості та суміжних галузей.

Починаючи з 5 випуску 2024 року редакцією було звужено проблематику журналу. Сфера діяльності журналу включає, але не обмежується, такі теми:

### **I. Інформаційні технології та електроніка:**

Прогрес у комп'ютерних технологіях, штучному інтелекті, машинному навчанні та застосуванні обробки даних у різних галузях.

Інновації в електронних системах, комунікаційних технологіях та вбудованих системах.

Інтернет речей (IoT), кібербезпека та цифрова трансформація в легкій промисловості.

### **II. Механічна та електрична інженерія:**

Розробка та оптимізація механічних систем, робототехніки та автоматизації у виробничих процесах легкої промисловості.

Інновації в електротехніці, включаючи енергетичні системи, технології відновлюваної енергії та електричні транспортні засоби, що мають відношення до галузі.

Застосування систем керування, мехатроніки та обробки сигналів в промислових і споживчих товарах легкої промисловості.

### **III. Матеріалознавство у модній індустрії та легкій промисловості:**

Дослідження передових матеріалів, включаючи "розумні" текстилі, стійкі матеріали та нанотехнології, зокрема для застосування в легкій промисловості.

Дослідження властивостей та характеристик матеріалів, що використовуються у виробництві текстилю, одягу та взуття.

Інновації у процесах обробки матеріалів, функціональних обробках та екологічно чистих виробничих практиках, орієнтованих на легку промисловість.

### **IV. Технології виробництва текстилю, одягу та взуття:**

Сучасні виробничі методики, включаючи 3D-друк, лазерне різання та автоматизацію у виробництві текстилю та одягу, специфічних для легкої промисловості.

Інновації у дизайні, створенні викрійок та контролі якості у сферах модної індустрії та легкої промисловості.

Стійкі та циркулярні економічні практики у виробництві текстилю та управлінні відходами.

### **V. Хімічні та біофармацевтичні технології:**

Прогрес у хімічній інженерії, включаючи оптимізацію процесів, реакційну інженерію та розробку нових хімічних процесів, що стосуються легкої промисловості.

Дослідження біофармацевтики, включаючи системи доставки ліків, біоактивні матеріали та біопроектну інженерію.

Інтеграція хімічних та біофармацевтичних технологій у сфери охорони здоров'я, косметики та модної індустрії, зокрема в контексті легкої промисловості.

Редакційна політика журналу «**Технології та інжиніринг**» базується на принципах об'єктивності та неупередженості при відборі статей для публікації; високі вимоги до якості наукових досліджень; обов'язкове рецензування статей; колегіальність у прийнятті рішень щодо публікації статей; доступність та оперативність у спілкуванні з авторами; суворе дотримання авторських і суміжних прав. Основним критерієм відбору матеріалів для публікації є їх оригінальність і актуальність ідеї, наукова та фактологічна достовірність викладеного матеріалу.

**Засновник та видавець видання:** иївський національний університет технологій та дизайну.

**Державна реєстрація:** ідентифікатор медіа R30-05423. Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 2520, протокол № 22 від 8 серпня 2024 року

**Рік заснування:** грудень 1999. Перереєстровано – у квітні 2021 р.

До 19 квітня 2021 року журнал мав назву «Вісник Київського національного університету технологій та дизайну» (Серія: Технічні науки). Видання є правонаступником журналу «Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности» (видавався з березня 1958 року).

**Періодичність випуску:** 6 разів на рік.

**Мова:** англійська.

**Головний редактор:** Ігор Васильович Панасюк.

До складу редакційної колегії входять науковці з України, Польщі, Іраку, Словацької Республіки, Німеччини, США, Чеської Республіки, Литви. Журнал дотримується етичних і професійних стандартів, що засновані на положеннях Публікаційної етики.

Журнал дотримується Політики відкритого доступу, підтримуючи принципи вільного поширення наукової інформації та глобального обміну знаннями, задля загального суспільного прогресу. Це означає, що весь його зміст перебуває у вільному доступі для користувачів безкоштовно. Повнотекстовий доступ до наукових статей журналу представлено в розділі Архів. Усі матеріали розповсюджуються згідно з умовами Creative Commons Attribution 4.0 International Public License, що дозволяє іншим поширювати статтю з визнанням авторства та її першої публікації в цьому журналі.

Журнал внесено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, відповідно до якого можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора та кандидата наук зі спеціальностей: технічні (наказ Міністерства освіти і науки України №735 від 29 червня 2021 р.): 122 – Комп'ютерні науки, 131 – Прикладна механіка, 133 – Галузеве машинобудування, 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 161 – Хімічні технології та інженерія, 132 – Матеріалознавство, 182 – Технології легкої промисловості, 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 144 – Теплоенергетика, 171 – Електроніка.

Статті приймаються через сайт: <https://technologies-engineering.com.ua/uk/submission>.

# ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

Комп'ютерний набір та макетування

КРИВОНОС Олена

Технічний редактор

ПАНАСЮК Ігор

Відповідальний за поліграфічне виконання

ОВЕЧКІНА Лілія

Підп. до друку 25.09.2024. Формат 60×84 1/8.  
Ум. друк. арк. 15,80. Облік. вид. арк. 12,38. Наклад 100 пр. Зам. 2090

Видавець і виготовлювач Київський національний університет технологій та дизайну.  
вул. Мала Шияновська, 2, м. Київ, 01011, Україна.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
Серія КВ №24822–14762 ПР від 19.04.2021р.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців,  
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 993 від 24.07.2002.

# TECHNOLOGIES AND ENGINEERING

Computer Typesetting & Modeling

KRYVONOS Olena

Technical Editor

PANASIUK Ihor

Responsible for printing

OVECHKINA Liliia

Printing proof 25.09.2024. Format 60×84 1/8.  
Conditional sheet 15.80. Calculated sheet 12.38. Circulation 100 copies. Order N 2090

KNUTD Instant Printing Department.  
Mala Shyianovska Street, 2, Kyiv, 01011, Ukraine.

Certificate КВ №24822–14762 ПР від 19.04.2021 р.

Certificate ДК № 993, 24.07.2002.