

**Головний редактор:**

канд. техн. наук *Топалов А. М.*

**Відповідальний секретар:**

канд. техн. наук *Мануляк І. З.*

**Редакційна колегія:**

д-р фіз.-мат. наук *Бандура А. І.*  
канд. техн. наук *Воронич А. Р.*  
д-р техн. наук *Горбійчук М. І.*  
канд. техн. наук *Грига В. М.*  
д-р техн. наук *Джала Р. М.*  
д-р фіз.-мат. наук *Дмитришин М. І.*  
д-р техн. наук *Древецький В. В.*  
д-р техн. наук *Дьомін Д. О.*  
д-р техн. наук *Журавська І. М.*  
д-р техн. наук *Заміховський Л. М.*  
д-р техн. наук *Козлов О. В.*  
канд. техн. наук *Криштопа Л. І.*  
канд. техн. наук *Кучірка Ю. М.*  
д-р техн. наук *Лежнюк П. Д.*  
д-р техн. наук *Лопатін В. В.*  
д-р техн. наук *Мельничук С. І.*  
д-р фіз.-мат. наук *Никифорчин О. Р.*  
д-р техн. наук *Осадчий С. І.*  
канд. техн. наук *Осієвський С. В.*  
канд. техн. наук *Паска Н. М.*  
д-р техн. наук *Рибіцький І. В.*  
д-р техн. наук *Рудакова Г. В.*  
д-р техн. наук *Середюк О. Є.*  
д-р техн. наук *Ситник О. С.*  
д-р фіз.-мат. наук *Смеляков С. В.*  
канд. техн. наук *Смолович Л. Р.*  
д-р техн. наук *Стрілецький Ю. Й.*  
д-р техн. наук *Сучков Г. М.*  
д-р техн. наук *Учанін В. М.*  
д-р техн. наук *Філевич П. В.*  
д-р техн. наук *Шекета В. І.*  
д-р техн. наук *Яцук В. О.*  
*Dr hab, prof. Atamanuk Igor*  
*Dr hab, prof. Mook Gerhard*  
*PhD, prof. Rzasa Mariusz*  
*Dr Sc., prof. Wojcik Waldemar*  
*PhD, prof. Zheng Yue*

**Адреса редакції**

76019, Україна, м. Івано-Франківськ,  
вул. Карпатська, 15,  
Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу  
Тел.: (0342) 72-71-68  
Факс: (0342) 54-71-39  
E-mail: [mmi@nung.edu.ua](mailto:mmi@nung.edu.ua)  
<http://www.nung.edu.ua>

**Редактори**

*Н. Р. Стецюк, О. О. Рощина*

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ №15834-4306 ПР від 16.10.2009.  
Журнал включено до переліку  
наукових фахових видань категорії «Б»  
на підставі наказу МОН України  
від 28 грудня 2019 р. № 1643.

Ідентифікатор у Реєстрі суб'єктів  
у сфері послуг R 30-01431  
згідно з рішенням від 26.10.2023 № 1154  
Національної ради України  
з питань телебачення і радіомовлення

## ЗМІСТ

### МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

*С. Ю. Плєснецов, К. Д. Вірченко, А. О. Колесниченко, Ю. О. Плєснецов*  
УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ  
РОЗМІРІВ ОБ'ЄКТІВ У ПЛОЩИНІ З ВИКОРИСТАННЯМ  
СКАНЛЯЙН-МЕТОДУ ..... 5

### ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

*О. І. Курандо, Ю. О. Плєснецов, С. Ю. Плєснецов*  
ПРОГНОЗУВАННЯ ВИНИКНЕННЯ ДЕФЕКТІВ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ..... 16

### МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

*О. В. Зівенко, А. Ю. Грєшинов, Ю. Д. Жуков*  
ХВИЛЕВОДНІ РІВНЕМІРИ: КАЛІБРУВАННЯ ТА ВПЛИВ УМОВ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ..... 23

*В. В. Малісевич, Д. О. Середюк, Ю. Т. Пелікан, В. Б. Катамай*  
ПРОВЕДЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЛІЧИЛЬНИКІВ  
ГАЗУ В ДІАПАЗОНІ ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ ДО 25 000 М<sup>3</sup>/ГОД  
В РАМКАХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ ..... 33

### МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

*О. Ю. Северін, Ю. О. Плєснецов, С. Ю. Плєснецов*  
ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ МІНІМАЛЬНОГО  
РАДІУСА МІСЦЯ ЗГІНАННЯ ПРИ ПРОФІЛЮВАННІ..... 46

### АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ КОМПЛЕКСИ

*Б. М. Гордєєв, Ж. Ю. Буруніна, І. П. Сабуцький*  
ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРИРОДООХОРОННОГО  
БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО СУДНА ЯК ОБ'ЄКТА  
АВТОМАТИЗАЦІЇ..... 53

*Н. І. Артюх, М. Ю. Єлісєєв*  
СИСТЕМА ОСВІТЛЕННЯ ВИРОБНИЧОГО ПРИМІЩЕННЯ  
КОМБІНОВАНОГО ТИПУ ..... 60

*В. А. Надточій, А. П. Бурунін*  
АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ КОРИСНИМ ВАНТАЖЕМ  
БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО КАТЕРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ  
МОРСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА..... 69

*М. І. Горбійчук, А. М. Лазорів, М. І. Когутяк*  
СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ МУФЕЛЬНОЇ ПЕЧІ .....81

*С. С. Некрасов, А. Ю. Довгополов, В. О. Колесник, В. В. Лупирь, І. М. Дегтярьов*  
РОЗРОБКА НАПІВАВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ АЕРОЗОЛЬНОГО МАСКУВАННЯ ДЛЯ НЕСПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ВІЙСЬКОВОГО ТА ЕВАКУАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУ .....94

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ, ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТА ДИСКРЕТНІ СТРУКТУРИ**

*В. В. Кравців, М. В. Марцінків, Т. В. Вівчар*  
КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕКОНОМІЧНОГО ЗРОСТАННЯ .....105

*А. В. Загороднюк, О. М. Голубчак*  
МУЛЬТИПЛІКАТИВНІ ФУНКЦІОНАЛИ НА ГІЛЬБЕРТОВИХ ПРОСТОРАХ СИМЕТРИЧНИХ АНАЛІТИЧНИХ ФУНКЦІЙ .....114

## **КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ**

*Д. В. Варанкін, І. М. Журавська, К. О. Обухова*  
СИСТЕМА ДАЛЬНЬОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ДАТЧИКІВ НА ОСНОВІ ОДНОПЛАТНИХ МІКРОКОМП'ЮТЕРІВ З LoRa.....121

*С. М. Бабчук, І. С. Бабчук*  
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ВІД ДОВЖИНИ СЕГМЕНТУ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ МЕРЕЖІ SAFETYBUS P .....130

*А. А. Шкітов, Н. Г. Бузоверя, О. А. Стадніченко, К. М. Мажуга, Т. В. Гуменюк*  
МЕТОДОЛОГІЧНА МАТРИЦЯ ЗАПОБІГАННЯ МІТМ-АТАКАМ У СТРАТЕГІЧНИХ ТА ЦИВІЛЬНИХ ІНФРАСТРУКТУРАХ .....137

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ .....147

# METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL

№2 (53) 2024

Published since 1997

**Founder:** Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**Publisher:** Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**Editor-in-Chief:**

*Cand. of Technical Sc. Topalov A. M.*

**Executive Secretary:**

*PhD Manulyak I. Z.*

**Editorial Board:**

*Dr. of Phys.-math. Sc. Bandura A. I.*  
*Cand. of Technical Sc. Voronych A. R.*  
*Dr. of Technical Sc. Horbiichuk M. I.*  
*Cand. of Technical Sc. Gryga V. M.*  
*Dr. of Technical Sc. Dzhala R. M.*  
*Dr. of Phys.-math Sc. Dmytryshyn M. I.*  
*Dr. of Technical Sc. Drevetskyi V. V.*  
*Dr. of Technical Sc. Diomin D. A.*  
*Dr. of Technical Sc. Zhuravska I. M.*  
*Dr. of Technical Sc. Zamikhovskiy L. M.*  
*Dr. of Technical Sc. Kozlov O. V.*  
*Cand. of Technical Sc. Kryshchak L. I.*  
*Cand. of Technical Sc. Kuchirka Yu. M.*  
*Dr. of Technical Sc. Lezhniuk P. D.*  
*Dr. of Technica lSc .Lopatin V. V.*  
*Dr. of Technical Sc. Melnychuk S. I.*  
*Dr. of Phys.-math Sc. Nykyforchyn O. R.*  
*Dr. of Technical Sc. Osadchyi S. I.*  
*Cand. of Technical Sc. Osieivskiy S. V.*  
*Cand. of Technical Sc. Pasieka N. M.*  
*Dr. of Technical Sc. Rybitskiy I. V.*  
*Dr. of Technical Sc. Rudakova A. V.*  
*Dr. of Technical Sc. Serediuk O. Ye.*  
*Dr. of Technical Sc. Sytnyk A. A.*  
*Dr. of Phys.-math Sc. Smelyakov S. V.*  
*Cand. of Technical Sc. Smolovik L. R.*  
*Dr. of Technical Sc. Striletskyi Yu. Y.*  
*Dr. of Technical Sc. Suchkov H. M.*  
*Dr. of Technical Sc. Uchanin V. M.*  
*Dr. of Technical Sc. Filevych P. V.*  
*Dr. of Technical Sc. Sheketa V. I.*  
*Dr. of Technical Sc. Yatsuk V. A.*  
*Dr hab, prof. Atamanyuk Igor*  
*Dr hab, prof. Mook Gerhard*  
*PhD, prof. Rzasa Mariusz*  
*DrSc., prof. Wojcik Waldemar*  
*PhD, prof. Zheng Yue*

**Address:**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
15 Carpathian str., 76019, Ivano-Frankivsk,  
Ukraine  
Tel.: (0342) 72-71-68,  
Fax: (0342) 545826  
E-mail: [mmi@nung.edu.ua](mailto:mmi@nung.edu.ua)  
<http://www.nung.edu.ua>

**Editors**

N. R. Stetsiuk, O. O. Rospopa

State Registration Certificate  
KB № 15834 – 4306 IIP Of 16.10.2009  
The journal is included in the list of scientific professional publications of category "B" on the basis of the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated December 28, 2019 No 1643

Identifier in the Register of entities in the service sector R 30-01431 according to 26.10.23 No 1154  
The National Council of Television and Radio Broadcasting

## CONTENT

### METHODS AND EQUIPMENT OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL

*S. Yu. Pliesnetsov, K. D. Virchenko, A. O. Koliesnychenko, Yu. O. Pliesnetsov*  
IMPROVEMENT OF THE ALGORITHM OF GEOMETRIC PARAMETER DEFINITION IN PLANE USING SCANLINE METHOD.....5

### MEASUREMENT OF PHYSICAL AND MECHANICS PARAMETERS OF SUBSTANCES

*O. I. Kurando, Yu. O. Pliesnetsov, S. Yu. Pliesnetsov*  
PREDICTION OF DEFECT APPEARANCE IN ROLLED SHAPES..... 16

### METHODS AND DEVICES OF FLOW MEASUREMENT OF LIQUID AND GASEOUS PHASES

*O. V. Zivenko, A. Yu. Hrieshnov, Yu. D. Zhukov*  
GUIDED WAVE RADAR LEVEL SENSORS: CALIBRATION AND ENVIRONMENTAL IMPACTS .....23

*V. V. Malisevich, D.O. Seredyuk, Y.T. Pelikan, V.B. Katamay*  
CONDUCTING METROLOGICAL RESEARCH OF GAS METERS IN THE RANGE OF GAS VOLUME FLOW UP TO 25,000 M<sup>3</sup>/HOUR WITHIN THE FRAMEWORK OF UKRAINE'S ENERGY SECURITY .....33

### METHODS AND DEVICES FOR THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS CONTROL

*O. Yu. Sievierin, Yu. O. Pliesnetsov, S. Yu. Pliesnetsov*  
DEFINING THE POSSIBILITY OF FORMING THE MINIMAL RADIUS OF BENDS DURING ROLL FORMING .....46

### AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED COMPLEXES

*B. M. Gordieiev, Zh. Yu. Burunina, I. P. Sabutskyi*  
INFORMATION MODEL OF AN UNMANNED SURFACE VESSEL AS AN OBJECT OF AUTOMATION.....53

*N. I. Artiukh, M. Yu. Yeliseiev*  
LIGHTING SYSTEM OF A COMBINED TYPE PRODUCTION PREMISES ..... 60

*V. A. Nadtochii, A. P. Burunin*  
AUTOMATION OF PAYLOAD CONTROL OF AN UNCREWED SURFACE BOAT FOR RESEARCH OF THE MARINE ENVIRONMENT ..... 69

<i>M. I. Horbiychuk, A. M. Lazoriv, M. I. Kohutiak</i> SYNTHESIS OF EFFICIENT SYSTEMS FOR CONTROLLING THE TEMPERATURE REGIME OF A MUFFLER FURNACE.....	81
--	----

<i>S. S. Nekrasov, A. Yu. Dovichopolov, V. O. Kolesnyk, V. V. Lupyry, I. M. Dehtiarov</i> ENGINEERING OF A SEMI-AUTOMATIC AEROSOL CAMOUFLAGE SYSTEM FOR NON-SPECIALISED MILITARY AND EVACUATION VEHICLES.....	94
---	----

## **MATHEMATICAL MODELING, COMPUTATIONAL METHODS, OPTIMAL CERULATION AND DISCRETE STRUCTURES**

<i>V. V. Kravtsiy, M. V. Martsinkiv, T. V. Vivchar</i> A CRITICAL REVIEW OF MATHEMATICAL MODELS OF ECONOMIC GROWTH.....	105
--	-----

<i>A.V. Zagorodniuk, O. M. Holubchak</i> MULTIPLICATIVE FUNCTIONS ON HILBERT SPACES OF SYMMETRIC ANALYTIC FUNCTIONS .....	114
--	-----

## **COMPUTER TECHNOLOGIES AND SYSTEMS**

<i>D. V. Varankin, I. M. Zhuravska, K. O. Obukhova</i> LONG-RANGE RADIO COMMUNICATION SYSTEM FOR SENSOR CONTROL BASED ON SINGLE- BOARD MICROCOMPUTERS WITH LoRa.....	121
--	-----

<i>S. M. Babchuk, I. S. Babchuk</i> MATHEMATICAL MODEL OF THE DEPENDENCE OF DATA TRANSMISSION RATE ON THE LENGTH OF THE SEGMENT OF THE SPECIALIZED NETWORK SAFETYBUS P.....	130
---	-----

<i>A. A. Shkitov, N. G. Buzoveria, O. A. Stadnichenko, K. M. Mazhuga, T. V. Humeniuk</i> METHODOLOGICAL MATRIX FOR PREVENTING MITM ATTACKS IN STRATEGIC AND CIVIL INFRASTRUCTURES .....	137
---	-----

REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF ARTICLES .....	147
---	-----

## МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 697.85, 004.4

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-5-15

### УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОБ'ЄКТІВ У ПЛОЩИНІ З ВИКОРИСТАННЯМ СКАНЛАЙН-МЕТОДУ

*С. Ю. Плєснецов, К. Д. Вірченко, А. О. Колєсниченко, Ю. О. Плєснецов*  
*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;*  
*вул. Курличова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: serhii.pliesnetsov@khpі.edu.ua*

Об'єктом дослідження в роботі є сплайн-аналіз сканлайну. Метою роботи є розробка удосконаленого алгоритму сканлайн-пошуку контуру та визначення геометричних параметрів зразків у площині з використанням засобів сплайн-інтерполяції. Наведено огляд ряду існуючих досліджень у сфері програмних рішень для визначення та аналізу контурів на зображеннях. Виявлено тренди розвитку алгоритмічних та нейромережових систем для пошуку контурів об'єктів, проте задача метрологічної оцінки таких об'єктів слабо розвинена і може бути досліджена. Виконано розробку методики пошуку точок на контурі з використанням сплайн-інтерполяції до вектору пікселів сканлайну з виявленням точок контрастного переходу через аналіз точок знакозміни шматкової функції сплайну на модулі функції похідної до функції сплайну з урахуванням контрастної різниці між дотичними точками на досліджуваному зображенні об'єкту контролю або вимірювання. Наведено відповідну візуалізацію для випадку простого сканлайну з математичним тестуванням на базі системи SciLab. На базі методики розроблено алгоритм аналізу сканлайну та розроблено програмний засіб, що реалізує даний алгоритм. Розробку виконано на базі рендеру, що реалізує стандарт OpenGL з використанням елементів бібліотеки Boost для виконання сплайн-інтерполяції, а також GTK для отримання охоплюючого прямокутника мінімальної площі методом обертового супорту. Оцінено достовірність результатів роботи, з результатами, що є прийнятними для інженерного використання програмного засобу за умови коректного налаштування. Тестування програмного засобу виконано на базі сукупності тестових зображень, що включали овальні ідеальні тестові зразки без градієнтних зон переходу та з двійковим кольором, модельні зразки, відрендерені засобами рендеру Cycles у складі Blender 3D, та фотографічні тестові зразки.

**Ключові слова:** метрологія, вимірювання, аналіз зображення, розробка програмного забезпечення, пошук контуру, сканлайн, сплайн-інтерполяція.

The object of research in the paper is the spline analysis of the scan line. The purpose of the work is the development of an improved algorithm for scanning contours and determination of geometric parameters of samples in the plane using spline interpolation tools. An overview of a number of existing studies in the field of software solutions for the definition and analysis of contours in images is presented. Trends in the development of algorithmic and neural network systems for finding contours of objects have been revealed, but the task of metrological assessment of such objects is poorly developed and can be investigated. The method of finding points on the contour was developed using spline interpolation to the vector of pixels of the scanline with the detection of points of contrast transition through the analysis of the points of change of sign of the piecewise function of the spline on the module of the function of the derivative of the function of the spline, taking into account the contrast difference between the tangent points on the investigated image of the control object or measurement. The appropriate visualization for the case of a simple scanline with mathematical testing based on the SciLab system is given. Based on the methodology, an algorithm for scanline analysis was developed and a software tool was developed that implements this algorithm. The development is based on a renderer that implements the OpenGL standard using elements of the Boost library to perform spline interpolation, as well as GTK to obtain an enclosing rectangle of minimum area by the rotary caliper method. The reliability of the work results was evaluated, with results that are acceptable for engineering use of the software under the condition of correct configuration. Testing of the software tool was performed on the basis of a set of test images, which included oval ideal test samples without gradient transition zones and with binary color, model samples rendered by Cycles rendering tools in Blender 3D, and photographic test samples.

**Keywords:** metrology, measurement, image analysis, software development, contour search, scanline, spline interpolation.

## **Вступ**

На даний момент системи розпізнавання контурів набувають широкого розповсюдження у всіх сферах життя, в тому числі у метрології. Системи пошуку та аналізу контурів дозволяють розпізнавати, класифікувати, досліджувати об'єкти на зображенні, проводити контроль та визначати їх характеристики.

Системи пошуку контурів можуть базуватись на алгоритмічних та нейронних моделях. У обох підходів є певні недоліки та переваги як з точки зору швидкодії, так і якості, і потрібних обчислювальних потужностей.

Водночас розпізнавання контурів у метрології, особливо українській, залишається відносно слабо розвинутою областю. Відповідно, робота у даному напрямку є актуальною.

**Мета роботи** – розробити удосконалений алгоритм сканлайн пошуку контуру та визначення геометричних параметрів зразків у площині з використанням засобів сплайн-інтерполяції.

## **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій**

Розпізнавання та уточнення контурів об'єктів на зображеннях є важливою технологією в різних сферах життя та має багато перспектив розвитку. Цей процес базується на методах комп'ютерного зору та штучного інтелекту (ШІ), і його використання постійно розширюється.

Стаття [1] присвячена розробці методу швидкого пошуку цифрових зображень у великих сховищах даних. На основі аналізу існуючих моделей і пошукових сервісів, автори пропонують використовувати спеціальний шаблон зображення, який є інваріантним до різноманітних трансформацій зображення, таких як стиснення, зміна яскравості чи інші ефекти. Створення шаблону для кожного зображення дозволяє значно прискорити процес пошуку і порівняння зображень у сховищах.

Основна увага зосереджується на ефективності методу, зокрема точності та швидкості пошуку. Запропонований алгоритм передбачає побудову шаблону зображення при його першому збереженні, після чого цей шаблон використовується для подальших пошуків. У статті також розглядаються проблеми, пов'язані з дублюванням зображень та їх різними трансформаціями.

Експериментально підтверджено, що метод дозволяє швидко і точно знаходити зображення в сховищах, що містять понад 100 тисяч зображень, з різними класами об'єктів, такими як обличчя, транспортні засоби, будівлі тощо.

Автор статті розповідає про розробку методу швидкого пошуку цифрових зображень у великих сховищах даних. Він пропонує алгоритм, який базується на створенні спеціальних шаблонів для кожного зображення, що дозволяє значно скоротити час пошуку. Метод орієнтований на інваріантність до трансформацій, таких як стиснення або зміна яскравості, що робить його ефективним для великих баз даних, де є ризик дублювання зображень або їх видозмін.

Стаття [2] присвячена дослідженню та застосуванню нейронних мереж для вирішення задач розпізнавання об'єктів у зображеннях. Автори акцентують увагу на важливості використання сучасних нейромережових підходів, які забезпечують високу точність і швидкість при роботі з великими обсягами даних та складними зображеннями.

Основні теми статті включають:

Принципи роботи нейронних мереж – описуються базові архітектури нейронних мереж, що застосовуються для розпізнавання об'єктів, такі як згорткові нейронні мережі (CNN). Пояснюється, як ці моделі використовують різні шари для витягнення характеристик з зображення і як вони навчаються розпізнавати різноманітні об'єкти.

Аналіз точності моделей – автори досліджують показники точності роботи нейронних мереж у задачах розпізнавання об'єктів. Проводяться експерименти на різних наборах даних, які демонструють переваги використання глибоких нейронних мереж для підвищення точності.

Переваги використання нейромережових підходів – у статті підкреслюється, що завдяки можливості навчання на великих наборах даних, нейронні мережі показують чудові результати в задачах класифікації і розпізнавання складних об'єктів, які можуть бути схожими або частково закритими.

Використання у реальних додатках – автори розглядають застосування нейромереж для розпізнавання об'єктів у різних галузях, таких як медицина, автомобільна промисловість, безпека та відеоспостереження. Завдяки використанню глибоких моделей, системи стають більш надійними та автоматизованими.

У роботі [3] виконано дослідження інтеграції машинного навчання (ML) в оптичну метрологію, розкриваючи покращення ефективності та результативності вимірювальних процесів. З акцентом на фазову демодуляцію, розгортання та перетворення фази у висоту, огляд підкреслює, як алгоритми ML трансформували традиційні методи оптичної метрології, пропонуючи покращену швидкість, точність і можливості обробки даних. Підвищення ефективності підкреслюється прогресом у генеруванні даних, інтелектуальному відборі та стратегіях обробки, де алгоритми ML пришвидшили метрологічне оцінювання. Ефективність підвищується в точності вимірювань, завдяки ML, що забезпечує надійні рішення для складних завдань розпізнавання образів і зменшення шуму. Крім того, підкреслюється роль паралельних обчислень з використанням графічних процесорів і програмованих

вентильних матриць, демонструючи їх важливість у підтримці обчислювально інтенсивних алгоритмів ML для обробки в реальному часі. Кульмінацією цього огляду є визначення майбутніх напрямків досліджень, підкреслення потенціалу передових моделей ML і більш широких застосувань в оптичній метрології.

Автори роботи [4] зазначають, що розпізнавання форм є активною темою досліджень у галузі комп'ютерного зору та графічних обчислень. Тим не менш, існуючі методи все ще мають певну низьку точність і ефективність, що значно обмежує їх застосування в системі комп'ютерного зору. У цьому документі досліджується обмеження структури ознак, яке по суті погіршує продуктивність розпізнавання. Крім того, ми пропонуємо швидкий метод розпізнавання форми, заснований на дворівневому обмеженні обмеження контурного кодування (CC2RR), який забезпечує більш ефективну теоретичну підтримку для практичного застосування візуального алгоритму. CC2RR зменшує обмеження, що виконуються від виділення та вираження контурних ознак відповідно. По-перше, для контуру форми обмеження виділення ознак контуру зменшено шляхом перетворення напрямку точок контуру на сегменти контуру; по-друге, для закодованого сегмента контуру обмеження вираження ознаки контуру зменшується; іншими словами, поточний напрямок зводиться до попереднього та наступного напрямків. Керуючись цими ідеями, кодова відстань Хеммінга використовується для узгодження характеристик кодування після подвійного зменшення обмежень, і отримані результати. Експериментальні результати підтверджують, що метод значно покращує продуктивність, яка працює до 500 разів швидше, ніж існуючі методи опису на основі контурів форми, одночасно збільшуючи надійність. Це робить метод корисним у практичній програмній системі.

Робота [5] спрямована на дослідження метрології контурів. У контурній метрології CD-SEM (скануючий електронний мікроскоп критичного розміру) призначає безперервну межу розширеним характеристикам зображення. Межа зазвичай призначається як проста функція інтенсивності сигналу, наприклад, порогом яскравості або градієнтом. Однак околиці різних точок уздовж межі об'єкта можуть значно відрізнятись. Деякі частини кордону можуть мати близькі сусідні об'єкти, тоді як інші є відносно ізольованими. Сусідні елементи можуть перешкоджати виходу вторинних електронів. Таким чином, різна близькість сусідів впливає на виявлену інтенсивність. Різниця інтенсивності, викликана різницею сусідства, може бути неправильно інтерпретована як зміщення контуру, наприклад, коли контур переходить від ізольованого сусідства до щільного. Величина цієї варіації зсуву оцінюється за допомогою зображень, створених JMONSEL, моделюючим методом Монте-Карло SEM вторинних електронних зображень, на основі простих зразків тестових моделей із різними околицями. Подібні структури згодом були виміряні як SEM, так і атомно-силовою мікроскопією (АСМ). Очевидні зрушення (тобто помилки) порядку від 0,5 нм до 1,0 нм для кожного краю спостерігалися як на модельованих, так і на вимірних SEM-зображеннях порівняно з AFM, коли положення країв призначалися за допомогою фіксованого контуру яскравості зображення. Призначення країв за яскравістю відносно локального фону та локальної максимальної яскравості призвело до вимірювань, які були менш чутливими до відмінностей сусідства.

### Щодо сплайн-інтерполяції

Сплайн-інтерполяція, подібно до поліноміальної інтерполяції, використовує поліноми низького ступеня в кожному з інтервалів і вибирає поліноміальні фрагменти так, щоб вони гладко підходили

один до одного. Отримана функція називається сплайном (рис. 1) [6,7].

Сплайн має відповідати певним базовим вимогам з такими обмеженнями:

1. Кожен поліном проходить через відповідні кінцеві точки.
2. Перші похідні збігаються у внутрішніх точках.
3. Другі похідні збігаються у внутрішніх точках.
4. Другі похідні звертаються в нуль у кінцевих точках.

В основі даної роботи лежить використання сплайн-інтерполяції для опису сканлайну при пошуку точок контрастного переходу.

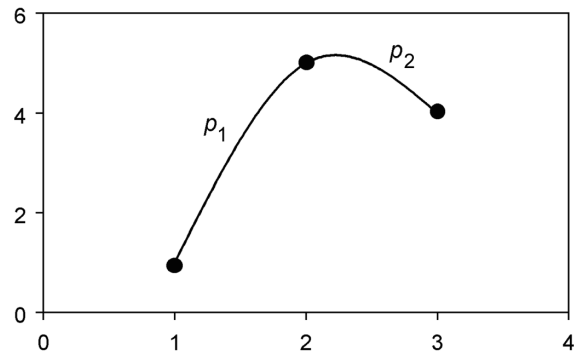


Рисунок 1 – Кубічний сплайн, інтерпольований між точками (1, 1), (2, 5) і (3, 4), будується з двох кубічних поліномів

### Теоретична база роботи

В узагальненому вигляді сканлайн є дискретним набором з  $n$  точок, кожна з яких має координати  $x$  та  $y$ :

$$S = \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_{n-1} \\ y_0 & y_1 & y_2 & y_3 & \dots & y_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Ці точки мають (можуть) знаходитись у залежності як дві множини  $S_x$  та  $S_y$ , утворюючи функціональну залежність  $S_y(S_x)$ .

Такі множини, зазвичай, найзручніше описувати з використанням сплайнів [8].

Сплайн-функція, область визначення якої розбита на частини, на кожному з частин функція є деяким поліномом (многочленом). Більш поширеним типом сплайн-інтерполяції є інтерполяція з використанням кубічних сплайнів [9].

Тож, сплайн-функцію  $t(x)$  можна представити як суму функцій:

$$t(x) = \sum_{i=0}^{n-1} f_i(x), \quad (2)$$

де  $f_i(x)$  – це функції, що у сукупності утворюють сплайн.

Однією з основних умов для коректної побудови кубічного сплайну є рівність значень похідних другого ступеня у кінцевих точках кожного зі шматків сплайну, тобто:

$$f_i''(x) = f_{i+1}''(x). \quad (3)$$

Очевидно, що похідна другого ступеня від кубічної параболи є функцією дотичної до цієї параболи у точці, а співпадіння значень дотичних гарантує виконання умови гладкості сплайну.

У найпростішому випадку, коли сканлайн має бінарну структуру (0, 1), сканлайн опис його матиме вигляд як представлено на рис. 2.

Як можна побачити, сплайн-представлення дає певне уявлення про структуру зображення, але вимагає аналізу істотної кількості екстремальних значень. Цю задачу можна спростити, якщо

використати як основу першу похідну  $|t'(x)|$  від знайденого сплайну.

Таким чином, основою для аналізу сканлайну при пошуку точок переходу стає аналіз модуля першої похідної від функції сканлайну.

### Програмно-алгоритмічна реалізація роботи

Існує широкий спектр інструментів для виконання сплайн-інтерполяції на базі різних програмних бібліотек та засобів.

Однією з більш поширених бібліотек загального застосування, що розробляється у кон'юнкції зі стандартом C++, є бібліотека Boost [10]. Як зазначають розробники, «ми прагнемо встановити «існуючу практику» та надати довідкові реалізації, щоб бібліотеки Boost були придатними для можливої стандартизації. Починаючи з десяти бібліотек Boost, включених до Технічного звіту бібліотеки (TR1), і продовжуючи з кожним випуском стандарту ISO для C++ з 2011 року, Комітет стандартів C++ продовжує покладатися на Boost як на цінне джерело для доповнень до стандартної бібліотеки C++».

Інструментар для сплайн інтерполяції надають такі програмні комплекси як

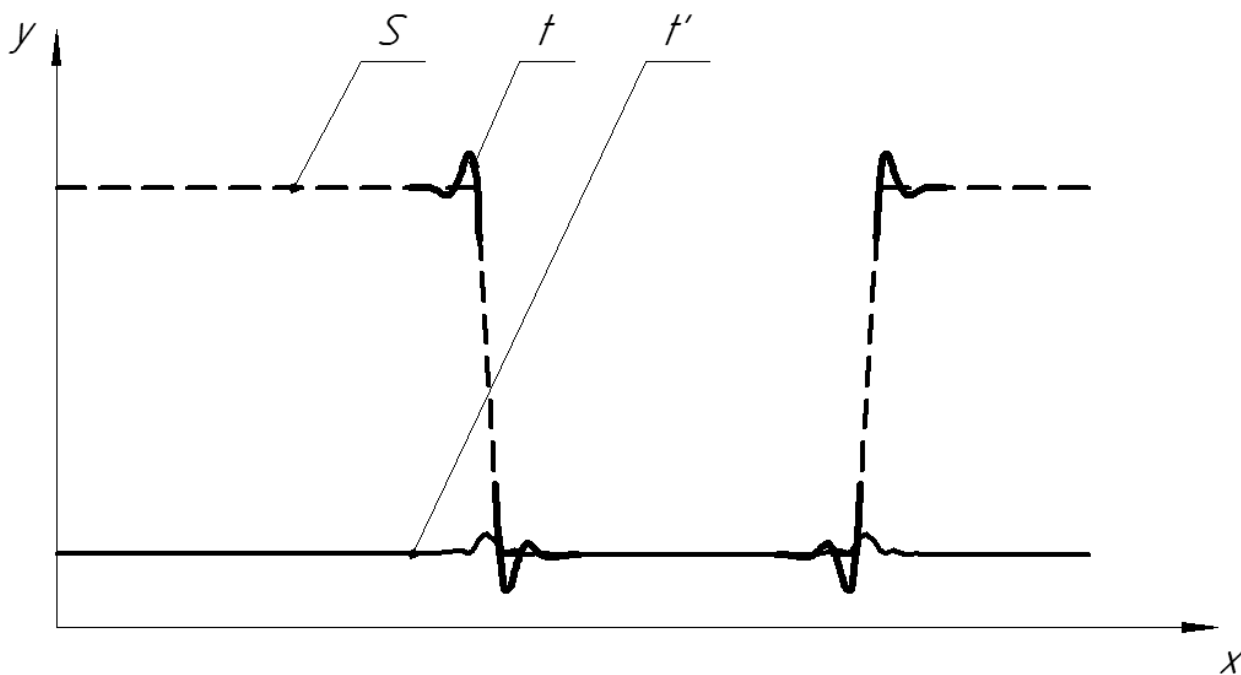


Рисунок 2 – Графічне представлення сканлайну

MathCAD, Matlab та Scilab [11]. Останній було використано при побудові математичного підходу при створенні наведеної у роботі алгоритміки

Клас кубічного B-сплайна, наданий Boost [12], дозволяє швидко й точно інтерполювати функцію, яка відома в рівновіддалених точках. Інтерполяція кубічного B-сплайна чисельно стабільна, оскільки використовує базисні функції з компактною підтримкою, побудовані за допомогою ітераційної згортки. На відміну від традиційної кубічної сплайн-інтерполяції, це погано обумовлено, оскільки глобальна підтримка кубічних поліномів призводить до того, що невеликі зміни далеко від точки оцінки мають великий вплив на обчислене значення.

Як показано у [13], якісне визначення контуру об'єкту з використанням сканлайн-методу є можливим з прийнятною точністю. Проте, в основі методу було закладено «брутфорс»-підхід, що ускладнювало задачу виявлення точок переходу у складних випадках.

В попередніх роботах використано розробку [14]. На базі створеної алгоритмічної бази постає необхідність удосконалення попередньо розроблених алгоритмів з урахуванням відповідної методики.

Розроблений алгоритм, структуру якого наведено на рис. 3, включає наступні етапи:

1) Отримати поточний сканлайн у вигляді набору (вектору) пікселів.

2) Усереднити кольорові канали кожного пікселю та привести до єдиного числового значення.

3) Виконати утворення сканлайну засобами бібліотеки Boost та отримати першу похідну для кожного пікселя.

4) Знайти точки знакозміності для першої похідної.

5) Відкинути точки знакозміності, контраст пікселів для яких не перевищує порогове значення.

6) Визначити координати точок з урахуванням масштабних коефіцієнтів.

7) Отримати випуклий охоплюючий контур для отриманого набору точок.

8) Отримати прямокутник із найменшою площею з використанням алгоритму обертальних супортів з бібліотеки GTK.

9) Обчислити значення габаритів отриманого прямокутника.

Розроблений програмний засіб базується на попередніх розробках кафедри КРСКД, показаних вище. Програма включає два основних логічні блоки: рендер та логічний блок.

Логічний блок відповідає за введення, обробку даних, відслідковування обраних користувачем операцій, налаштувань, тощо.

Рендер реалізовано на базі попередніх наробок автора [15], спрямованих на створення функціональної бібліотеки для рендерінгу на базі OpenGL. Рендер надає можливість виводити, масштабувати, переміщувати зображення, відображати точки та лінії заданого кольору, оновлювати дані.

Рендер пов'язаний з логічним модулем. Вікно рендеру використовується для визначення координатного введення даних користувачем.

Окрім вікна рендеру, інтерфейс користувача розробленого програмного засобу включає панель інструментів (рис. 4), що включає кнопку відкриття зображення (1), інструменти налаштування масштабних коефіцієнтів (2), налаштування порогу виявлення контрастних точок (3), кнопку виклика автовимірювання (4) з можливістю використовувати як новий, так і старий алгоритм за відповідним налаштуванням (5). результати вимірювань поміщуються до відповідного журналу (6).

Вихідний код оновленої функції, створеної у відповідності до розробленого алгоритму (рис. 3) наведено на відповідній сторінці GitHub [15].

Тестування розробленого ПЗ виконувалось на базі трьох типів графічних зразків:

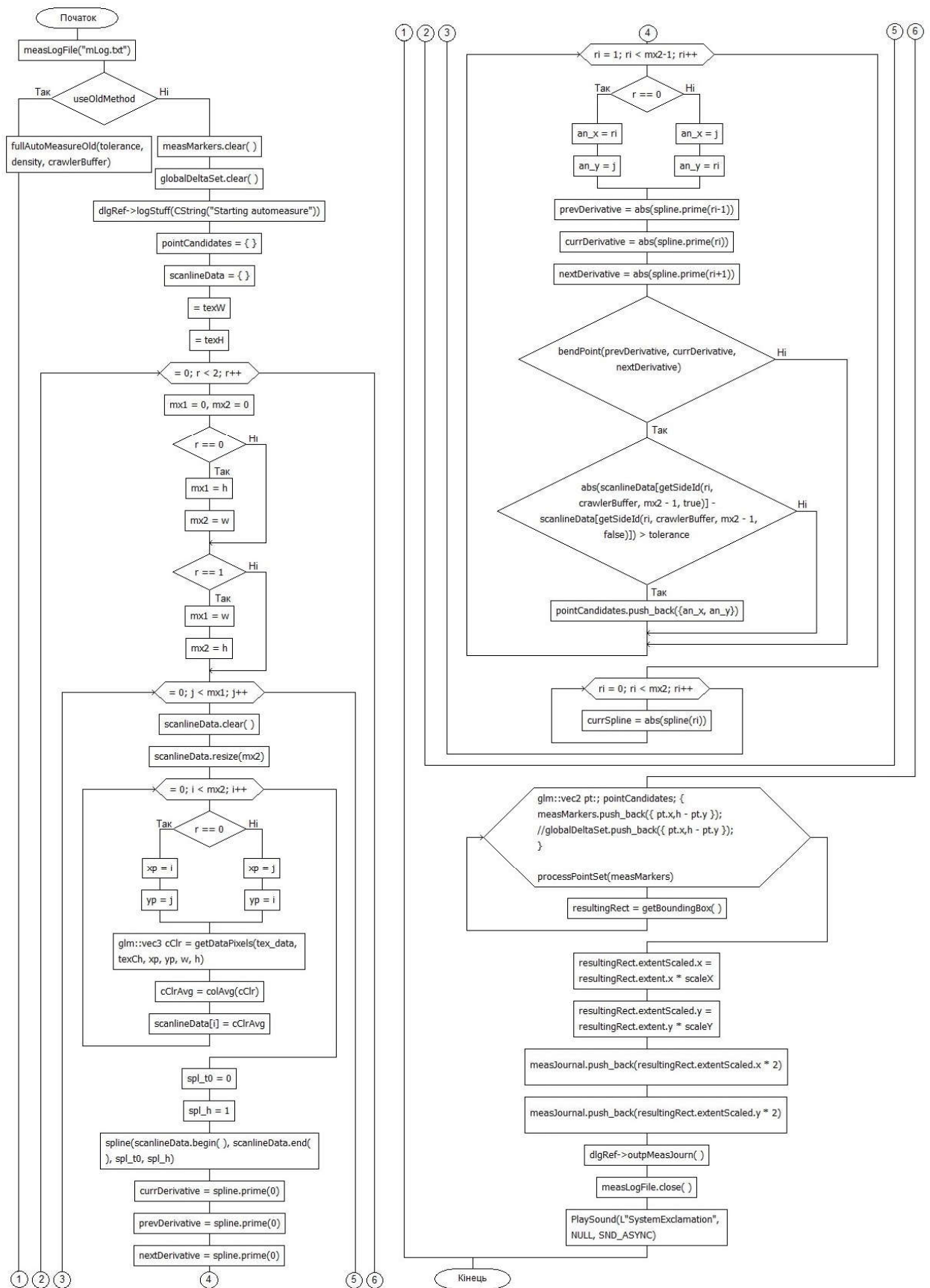


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритму сканлайн пошуку контуру та визначення розмірів об'єкту на базі сплайн-інтерполяції

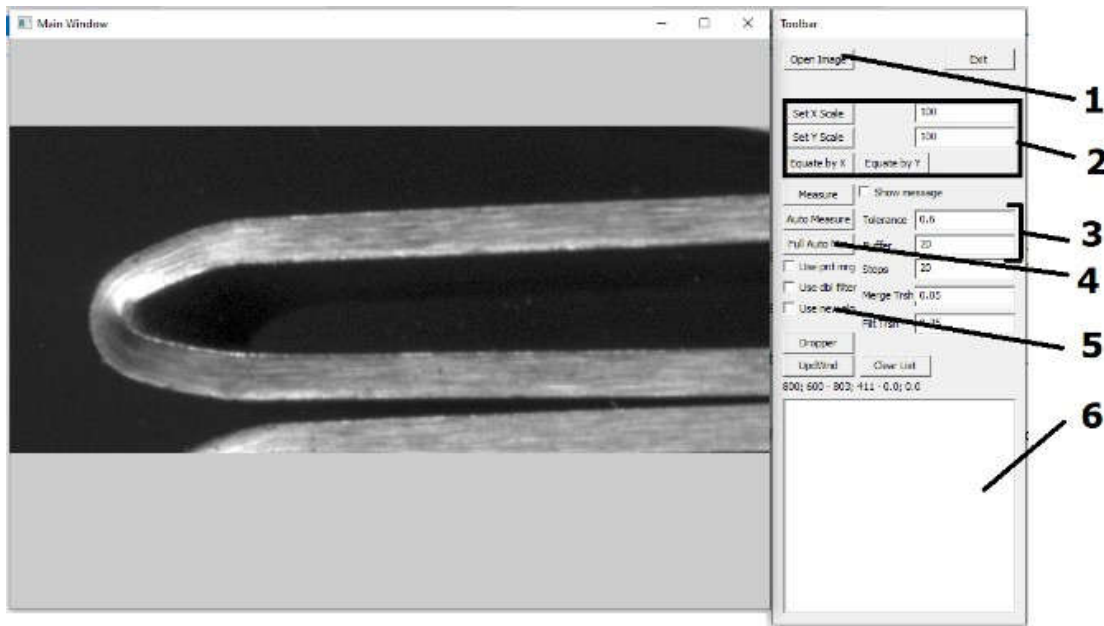


Рисунок 4 – Значущі елементи інтерфейсу користувача розробленого програмного засобу  
 1 – відкриття зображення, 2 – налаштування масштабних коефіцієнтів, 3 – налаштування порогового значення та ширини буферу, 4 – виклик автовимірювача, 5 – активація оновленого алгоритму автовимірювання, 6 – урнал результатів вимірювання

1) ідеальні зразки, що мають безумовну контрастність на рівні 100%;

2) модельні зразки, рендери яких було отримано з використанням ПЗ Blender 3D [16, 17];

3) фотозразки відомих габаритів.

На рис. 5 – 10 відображено результати тестування алгоритму на зразках наведених типів.

Тестування показало, що оновлений алгоритм, загалом, надає більш високу точність визначення контуру за умови коректного налаштування, ніж брутфорс-версія попередньої реалізації, і спрацьовує коректно у більшій кількості випадків.

При коректному налаштуванні алгоритм надає відповідність номінальному значенню, що відрізняється не більше, ніж на 4 відсотки.

В той же час алгоритм на базі сплайну є більш повільним, іноді до 3-4 разів, виконуючи обробку кадру 1024x1024 протягом 3-4 секунд проти 0,7-1 секунди для брутфорс-алгоритму, хоча на дані результати може додатково впливати щільність сканування та ряд інших параметрів, урахування яких не входило у задачі роботи.

## Висновки

1. Проаналізовано існуючі українські та зарубіжні дослідження щодо аналізу та розпізнавання контурів об'єктів на зображеннях. Виявлено тренди розвитку алгоритмічних та нейромережових систем для пошуку контурів об'єктів, проте задача метрологічної оцінки таких об'єктів розвинута слабо, і тому потребує дослідження.

2. Створено методику аналізу зображення на основі сплайн-інтерполяції сканлайну з аналізом значень перших похідних функцій сплайну у точках знакозміни для виявлення точок контрастного переходу на сканлайні.

3. На основі створеної методики розроблено алгоритм для пошуку точок знакозміни у вибірці перших похідних кускової сплайн-функції для заданого набору пікселів.

4. Реалізовано розроблений алгоритм у вигляді оновленої функції автоматичного вимірювання, отримано приріст точності в середньому на 1% (від 5% до 4%) за рахунок підвищення часу виконання алгоритму. Програмне рішення реалізовано на базі OpenGL-рендеру та бібліотеки сплайн-інтерполяції у складі Boost.

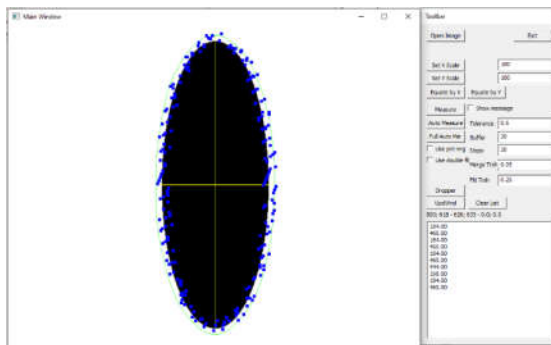


Рисунок 5 — Ідеальний зразок для широкого буфера

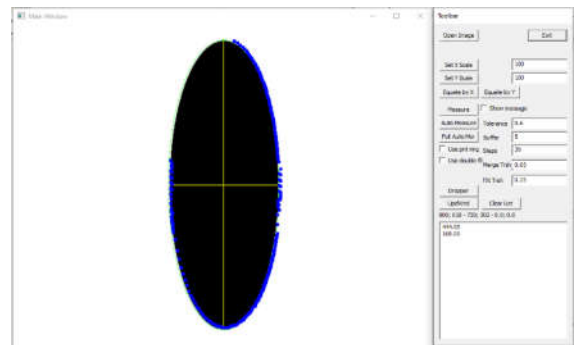


Рисунок 6 — Ідеальний зразок для вузького буфера

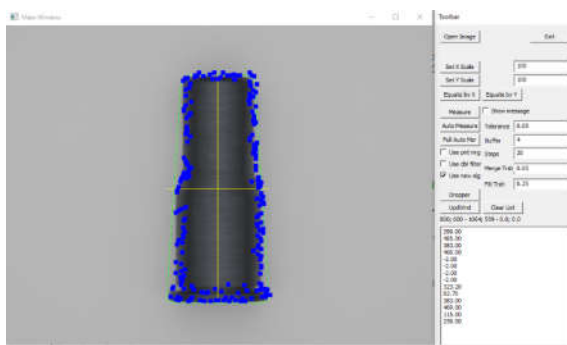


Рисунок 7 — Модельний зразок пуансону для витягування

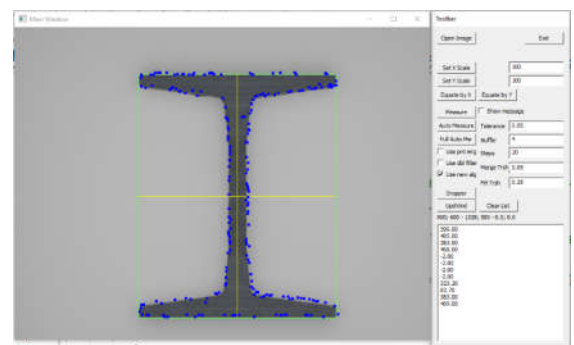


Рисунок 8 — Модельний зразок двотавру

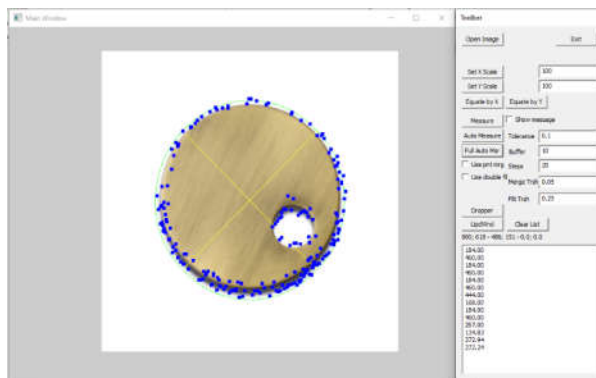


Рисунок 9 — Фізичний зразок бірки

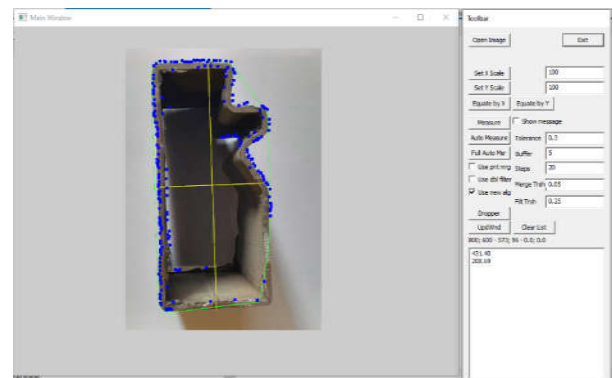


Рисунок 10 — Фізичний зразок профілю опалубки

### Список використаних джерел

1. Смеляков К.С., Сандркін Д.Л., Товчиречко Д.О., Вакулік Є.В., Дроб Є.М. Розробка методу швидкого пошуку цифрового зображення у сховищах даних. *Системи обробки інформації*. 2021. С.54-63. DOI: [10.30748/soi.2021.165.07](https://doi.org/10.30748/soi.2021.165.07)
2. Борківський Б., Теслюк В. Використання нейромережових засобів для розпізнавання об'єктів у мобільних

системах з обходом перешкод. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2023. Том 33. №4. С. 84-89. DOI:[10.36930/40330412](https://doi.org/10.36930/40330412)

3. Xue Ruidong, Hooshmand Helia, Isa Mohammed, Piano Samanta, Leach Richard. Applying machine learning to optical metrology: a review. *Measurement Science and Technology*. 2024. Vol. 36. DOI:[10.1088/1361-6501/ad7878](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad7878)

4. Li Zekun, Guo Baolong, Meng Fanjie, Jiang Bingting. Fast shape recognition via a

bi-level restraint reduction of contour coding. *The Visual Computer*. 2023. Vol. 40. P. 2599–2614. DOI:[10.1007/s00371-023-02940-9](https://doi.org/10.1007/s00371-023-02940-9)

5. Villarrubia John, Dixson Ronald, Vladár András. Proximity-associated errors in contour metrology. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2010. 7638. DOI:[10.1117/12.848406](https://doi.org/10.1117/12.848406)

6. Ferguson, J. Multivariable curve interpolation. *Journal of the ACM (JACM)*, 1964. Vol. 11, No. 2. P. 221-228.

7. Cubic spline Interpolation. Geeks for Geeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/cubic-spline-interpolation/>

8. Малачівський П.С., Скопецький В.В. Неперервне й гладке мінімаксне сплайн-наближення. Київ: Наукова думка, 2013. 271 с.

9. Довгий Б.П., Ловейкін А.В., Вакал Є.С., Вакал Ю.Є. Сплайн-функції та їхнє застосування: Навч. посіб. Київ: ВПЦ "Київський університет", 2017. 120 с.

10. Boost C++ Libraries. URL: <https://www.boost.org/>

11. Scilab. URL: <https://www.scilab.org/>

12. Cubic B-spline interpolation. Boost C++ Libraries Documentation. URL: [https://live.boost.org/doc/libs/1\\_65\\_0/libs/math/doc/html/math\\_toolkit/interpolate/cubic\\_b.html](https://live.boost.org/doc/libs/1_65_0/libs/math/doc/html/math_toolkit/interpolate/cubic_b.html)

13. Зайченко М. С., Плєснецов С. Ю. Визначення геометричних параметрів об'єкту контролю сканлайн-методом. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 17-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 28-30 листопада 2023 р.* Харків, 2023. С. 46. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/72741>

14. Плєснецов С. Ю. Копач К. Д. Реалізація програмної бібліотеки для шейдерного OpenGL-рендеру в межах розробки вимірювальної системи. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я / Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 31-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2023, 17-20 травня 2023 р.* Харків : НТУ

"ХПІ", 2023. С. 486. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/71935>

15. farseer3\_mfc. GitHub URL: [https://github.com/Rastrelly/farseer3\\_mfc](https://github.com/Rastrelly/farseer3_mfc)

16. Blender. URL: <https://www.blender.org/>

17. Акулов С.О., Плєснецов С.Ю. Алгоритм автоматичного пошуку геометричних параметрів об'єкту у площині з використанням удосконаленого сканлайн-алгоритму. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2024, 22-25 травня 2024 р.* Харків. – НТУ «ХПІ». С. 496.

## References

1. Smeliakov K.S., Sandrkin D.L., Tovchyrchko D.O., Vakulik Ye.V., Drob Ye.M. Rozrobka metodu shvydkoho poshuku tsyfrovoho zobrazhennia u skhovyshchakh danykh. *Systemy obrobky informatsii*. 2021. P.54-63. DOI:[10.30748/soi.2021.165.07](https://doi.org/10.30748/soi.2021.165.07) [in Ukrainian]

2. Borkivskyi B., Tesliuk V. Vykorystannia neiromerezhevnykh zasobiv dlia rozpoznavannia obektiv u mobilnykh systemakh z obkhodom pereshkod. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2023. Vol. 33. No 4. P. 84-89. DOI:[10.36930/40330412](https://doi.org/10.36930/40330412)[in Ukrainian]

3. Xue Ruidong, Hooshmand Helia, Isa Mohammed, Piano Samanta, Leach Richard. Applying machine learning to optical metrology: a review. *Measurement Science and Technology*. 2024. Vol. 36. DOI:[10.1088/1361-6501/ad7878](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad7878)

4. Li Zekun, Guo Baolong, Meng Fanjie, Jiang Bingting. Fast shape recognition via a bi-level restraint reduction of contour coding. *The Visual Computer*. 2023. Vol. 40. P. 2599–2614. DOI:[10.1007/s00371-023-02940-9](https://doi.org/10.1007/s00371-023-02940-9)

5. Villarrubia John, Dixson Ronald, Vladár András. Proximity-associated errors in contour metrology. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2010. 7638. DOI:[10.1117/12.848406](https://doi.org/10.1117/12.848406)

6. Ferguson, J. Multivariable curve interpolation. *Journal of the ACM (JACM)*, 1964. Vol. 11, No. 2. P. 221-228.
7. Cubic spline Interpolation. Geeks for Geeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/cubic-spline-interpolation/>
8. Malachivskiy P.S., Skopetskiy V.V. Neperervne y hladke minimaksne splain-nablyzhennia. Kyiv: Naukova dumka, 2013. 271 p. [in Ukrainian]
9. Dovhyi B.P., Loveikin A. V., Vakal Ye. S., Vakal Yu.Ie. Splain-funktsii ta yikhnie zastosuvannia. Kyiv: VPTs "Kyivskiy universytet", 2017. 120 p. [in Ukrainian]
10. Boost C++ Libraries. URL: <https://www.boost.org/>
11. Scilab. URL: <https://www.scilab.org/>
12. Cubic B-spline interpolation. Boost C++ Libraries Documentation. URL: [https://live.boost.org/doc/libs/1\\_65\\_0/libs/math/doc/html/math\\_toolkit/interpolate/cubic\\_b.html](https://live.boost.org/doc/libs/1_65_0/libs/math/doc/html/math_toolkit/interpolate/cubic_b.html)
13. Zaichenko M. S., Pliesnetsov S. Yu. Vyznachennia heometrychnykh parametriv ob'ektu kontroliu skanlain-metodom. *Teoretychni ta praktychni doslidzhennia molodykh vchenykh : zb. tez dop. 17-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf. mahistrantiv ta aspirantiv, 28-30 lystopada 2023 r.* Kharkiv, 2023. P. 46. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/72741>[in Ukrainian]
14. Pliesnetsov S. Yu. Kopach K. D. Realizatsiia prohramnoi biblioteky dlia sheidernoho OpenGL-renderu v mezhakh rozrobky vymiriualnoi systemy. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia / Information technologies: science, engineering, technology, education, health : tezy dop. 31-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD-2023, 17-20.05.2023.* Kharkiv : NTU "KhPI", 2023. P. 486. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/71935>[in Ukrainian]
15. farseer3\_mfc. GitHub URL: [https://github.com/Rastrelly/farseer3\\_mfc](https://github.com/Rastrelly/farseer3_mfc)
16. Blender. URL: <https://www.blender.org/>
17. Akulov S.O., Pliesnetsov S.Yu. Alhorytm avtomatychnoho poshuku heometrychnykh parametriv ob'ektu u ploshchyni z vykorystanniam udoskonalenooho skanlain-alhorytmu. *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei XXXII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2024, 22-25.05.2024.* Kharkiv: NTU «KhPI». P. 496. [in Ukrainian]

#### IMPROVEMENT OF THE ALGORITHM OF GEOMETRIC PARAMETER DEFINITION IN PLANE USING SCANLINE METHOD

S. Yu. Pliesnetsov, K. D. Virchenko,  
A. O. Koliesnychenko, Yu. O. Pliesnetsov

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute";  
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine;  
e-mail: [serhii.pliesnetsov@kpi.edu.ua](mailto:serhii.pliesnetsov@kpi.edu.ua)

## ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

---

---

УДК 620.179.1

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-16-22

### ПРОГНОЗУВАННЯ ВИНИКНЕННЯ ДЕФЕКТІВ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ

*О. І. Курандо, Ю. О. Плєснецов, С. Ю. Плєснецов**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: Yuri.Pliesnetsov@khp.edu.ua*

Зростання споживання гнутих профілів, що спостерігається за останнє десятиліття у різних галузях виробництва та будівництва, вимагає пошуку нових технологічних рішень та застосування нових матеріалів, що забезпечують високу якість виробів за мінімальних витрат у процесі виробництва. Широке застосування профілів у будівництві (декоративні стінові та покрівельні панелі зовнішнього виконання, внутрішні декоративні панелі, силові несучі конструкції) зумовлює високі вимоги до їх захисно-декоративних властивостей, що досягається застосуванням відповідних покриттів. Гнуті сталеві профілі набули значного поширення в машинобудуванні та інших промислових галузях за останні роки. Вони слугують основою для різноманітних конструкцій — від простих огорож до складних механізмів і машин. Від їхньої якості залежить міцність, довговічність і безпека готових виробів. В даний час широке застосування знаходять процеси безпосереднього виготовлення профілів з листового матеріалу, який має багатошарове покриття, що вже нанесене у промислових умовах. Таке покриття має високі характеристики міцності, широку кольорову гаму і відмінну корозійну стійкість. Виготовлення профілю з такого матеріалу є більш ефективним, ніж нанесення покриття на вже готовий профіль. Інтенсифікація формоутворення дозволяє зменшити кількість технологічних переходів, забезпечити здешевлення обладнання, підвищити його мобільність, компактність, економічність, знизити витрати на площі, яке воно займає, зменшити час переналагодження та ін. Отже, важливо знати, яким чином визначати якість гнутих профілів перед їх використанням. До основних переваг гнутих профілів відносяться: необмежений асортимент поперечних перетинів гнутих профілів, що отримуються профілюванням; висока продуктивність виробництва; можливість деформаційного зміцнення матеріалу, яке обумовлено особливостями процесу профілювання. Разом з перевагами, мають місце досить високі витрати через наявність браку. Ці обставини потребують аналізу причин, які можуть призвести до виникнення дефектів гнутих профілів. У роботі представлена класифікація дефектів гнутих профілів та перелік можливих причин їх виникнення, що є важливим та актуальним завданням щодо аналізу технологічних процесів виробництва гнутих профілів та забезпечення контролю їх якості.

**Ключові слова:** дефекти, класифікація, якість, асортимент, матеріали, покриття, неруйнівний контроль, вимірювання, властивості матеріалів.

The increase in the consumption of bent profiles, which has been observed in the last decade in various industries of production and construction, leads to the search for new technological solutions and the use of new materials that ensure high quality of products at minimal production costs. The wide use of profiles in construction (decorative wall and roof panels of external execution, internal decorative panels, power-bearing structures) leads to high requirements for their protective and decorative properties, which is achieved by the use of appropriate coatings. Bent steel profiles are increasingly used in machine building and other industries in recent years. They are used as a basis for various structures, from simple fences to complex machines and mechanisms. The quality of these profiles directly affects the strength, durability and safety of structures. In our time, the processes of direct production of profiles from sheet material, which has a multi-layer coating, which has already been applied in industrial conditions, are widely used. This coating has high strength characteristics, a wide range of colors and excellent corrosion resistance. Making a profile from such material is more effective than applying a coating to an already finished profile. The intensification of molding makes it possible to reduce the number of technological transitions, ensure the equipment becomes cheaper, increase its mobility, compactness, economy, reduce the cost of the space it occupies, reduce the time of reconfiguration, etc. Therefore, it is important to know how to determine the quality of bent profiles before using them. The main advantages of bent profiles include: an unlimited range of cross-sections of bent profiles obtained by profiling; high production productivity; the possibility of deformation

hardening of the material, which is due to the features of the profiling process. Along with the advantages, there are quite high costs that arise as a result of the defect. These circumstances require an analysis of the reasons that can lead to defects in bent profiles. The study presents a classification of defects in bent profiles and a list of potential causes for their occurrence, which represents an important and relevant task for analyzing the technological processes involved in the production of bent profiles and ensuring their quality control.

**Keywords:** defects, classification, quality, assortment, materials, coating, non-destructive testing, measurement, material properties.

### Вступ

На сьогоднішній день у технічних системах застосовують більше 250 типорозмірів спеціальних гнутих профілів. Перетини найбільш вживаних із них, наведені у табл. 1 та табл. 2.

У вагонобудуванні гнуті профілі дозволяють отримувати нові конструктивні рішення щодо окремих вузлів та елементів вагонів. У конструкції чотиривісних суцільнометалевих вагонів близько 25% його маси складають гнуті профілі, які дозволяють створити напіввагон з високими експлуатаційними якостями та сучасним зовнішнім виглядом.

### Класифікація дефектів гнутих профілів

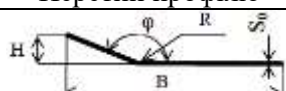
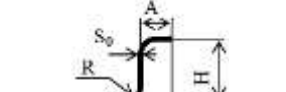
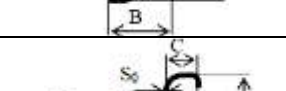
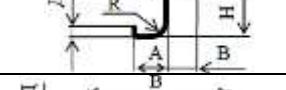
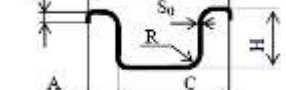
Дефекти просторової форми виникають через порушення режимів та схем формоутворення [1-8].

Прогин у вертикальній площині (повздовжній прогин) профілю може спричинити: помилки у виборі діаметрів

формуючих валків; неправильне положення осі профілювання у вертикальній площині; нерівномірний зазор калібру валків; відхилення ширини заготовки; невірне налаштування правильного пристрою. Цей різновид дефектів спостерігається на профілях практично всіх типорозмірів, що пов'язано з різницею поздовжніх деформацій полиць, які підгинаються, та стінки профілю внаслідок порушення режимів і схем формоутворення.

Прогинання профілю у горизонтальній площині (шаблеподібність) відбувається з наступних причин: неправильне положення осі профілювання в горизонтальній площині; нерівномірний зазор у валках профілезгинального стану; бічне зміщення заготовки на попередніх переходах; шаблеподібність вихідної заготовки (більше 3 мм/м); помилкова схема формоутворення несиметричного профілю, або неправильне налаштування.

Таблиця 1 – Спеціальні гнуті профілі

№	Перетин профілю	A	B	C	Д	H	R	S <sub>0</sub>
1		80-135	10-43	-	-	15-98	1,6-6,4	0,5-3,2
2		8-52	25-92	-	-	7-77	1,5-5,6	0,3-0,8
3		13-17	25-120	10-45	4-13	13-100	1,0-8,6	0,5-2,3
4		6-25	36-126	16-48	4-22	22-64	2,3-7,1	0,6-2,6
5		1-13	8-35	-	-	10-22	4-11	0,5-1,3

Таблиця 2 – Гнуті профілі з відбортуваннями, що застосовуються у машинобудуванні

№	Перетин профілю	Найменування	Застосування
1		Спеціальний кутик	Окантування, силові елементи
2		Спеціальний С-подібний	Лінії телефонного зв'язку
3		Спеціальний профіль	Лінії телефонного зв'язку
4		Спеціальний профіль	Теплиці
5		Спеціальний профіль	Автомобілебудування
6		Спеціальний профіль	Автомобілебудування
7		Корито-подібний	Автомобілебудування

Скручування профілю може відбуватися через: помилки у виборі схем формування; зміщення осі профілювання; нерівномірності зазору в валкових калібрах; відхилень параметрів заготовки (шаблеподібність, різнотовщинність, використання закритих роликів калібрів); неправильне налаштування правильного блоку.

Найбільшому скручуванню піддаються несиметричні профілі, хоча в більшості випадків скручування може бути усунуто відповідним налаштуванням правильного пристрою. Усунення скручування рідше призводить до втрати стійкості периферійних елементів профілю, ніж запобігання повздовжньому прогину профілю за допомогою правильного пристрою. Скручування є наслідком незбалансованості

деформаційних характеристик полиць, що підгинаються. У профілюванні попередження скручування профілів частково досягається за рахунок: підгинання полиць на різні кути; комбінації підгинання та розгинання меншої за шириною полиці; повороту перетину профілю відносно осі профілювання.

Відхилення розмірів перетину профілю від номінальних розмірів проявляється у: недоформуванні профілю по висоті; відхиленнях по ширині полиці; пружиненні та відхиленнях у місцях згинання.

Недоформування профілю по висоті пов'язане із: заниженою шириною вихідної заготовки; нерівномірним зазором; розкриттям валкового калібру.

Відхилення по ширині профілю часто відбуваються через зміну кривизни місця згинання в процесі деформування, що пов'язано з пружними деформаціями. При розвантаженні (виході профілю з калібру чергової пари валків) профіль розширюється навіть за відсутності значних відхилень кутів у місцях згинання. При стисненому згинанні пружинення може бути також від'ємним через осадження заготовки в замкненому калібрі.

Різнотовщинність – зміна товщини матеріалу профілю, обумовлене нестабільними умовами профілювання. Так, при гарячому прокатуванні різнотовщинність найчастіше викликається зміною зазору між валками та коливанням зусиль прокатування. Різнотовщинність також може стати наслідком незадовільної якості профілюючих валків.

Втрата стійкості елементів гнутого профілю регламентується відповідними нормативними документами, оскільки є причиною, що перешкоджає скороченню числа переходів.

Лінії Чернова-Людерса – це сліди площин ковзання, що виходять на поверхні вихідної заготовки. Дефекти псують зовнішній вигляд гнутих профілів,

зменшують точність їх розмірів, що призводить до браку.

Кромкова хвилястість – неплосцинність у вигляді чергування гребнів і западин, що утворюються внаслідок нерівномірного витягування металу по довжині та ширині штаби або листа. Це дефект найчастіше виникає при виготовленні тонкостінних широкополічних гнутих профілів. При високій жорсткості полиць, що підгинаються, може мати місце, як кромкова хвилястість, так і злам полиці. Злами полиць утворюються при виникненні місцевої пластичної деформації внаслідок різких перегинів і є невиправним браком профілю.

#### **Дефекти гнутих профілів, пов'язані з руйнуванням**

Дефекти поверхні гнутих профілів проявляються у вигляді: задирок; подряпин; руйнування покриття.

Причиною задирок і подряпин можуть бути: жорсткі схеми формоутворення (велика контактна напруга); незадовільна якість поверхні формувальних валків; нерівномірний зазор в калібрі робочих валків; надмірна ширина заготовки при виготовленні профілю в закритих калібрах. При виготовленні сталевих тонкостінних профілів без покриття проблем, пов'язаних із зазначеними поверхневими дефектами, зазвичай не виникає.

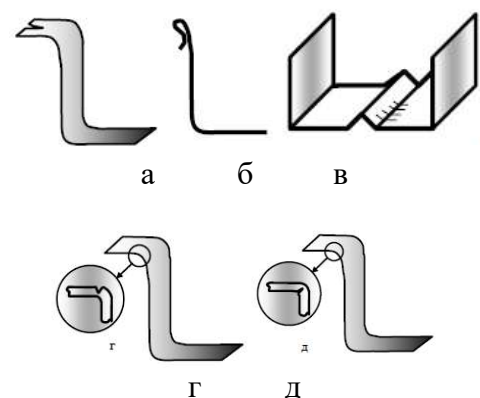
Такий дефект, як нерівномірне деформаційне зміцнення, пов'язаний із зміною механічних властивостей матеріалу заготовки та зазвичай супроводжується зниженням пластичності окремих її ділянок. Цей дефект є результатом: різних обтискань з боків вихідної заготовки; різнотовщинності; нерівномірного нагрівання по ширині заготовки та ін.

При несприятливому впливі на механічні властивості металу (порушенні вимог при термообробці) може виникати крупнозернистість.

При високій жорсткості полиць, що підгинаються може мати місце, як хвилястість кромки, так і злам полиці

(рис. 1, а). Злами утворюються при місцевій пластичній деформації внаслідок різких перегинів і є невиправним браком профілю.

Зминання (рис. 1, б) можна віднести до браку профілю. Найчастіше воно виникає при контакті заготовки із буртом валка. Причиною дрібних складок на внутрішній поверхні (рис. 1, в) є несприятливе поєднання силових факторів, нерівномірний зазор валкового калібру.



**Рисунок 1 – Дефекти гнутих профілів:**  
а – злам полиці, б – зминання, в – дрібні складки,  
г – руйнування зовнішнього контуру,  
д – затискачі

Найбільш серйозними дефектами гнутих профілів є дефекти, пов'язані з руйнуванням. Тріщини (руйнування зовнішнього контуру) (рис. 1, г) виникають у місцях вигину на зовнішній поверхні і найчастіше призводять до остаточного відбракування прокату. Причини тріщиноутворення: недостатня пластичність металу та дефекти його мікроструктури; малі радіуси згинання під час профілювання; наявність рисок або глибоких подряпин, що збігаються із зовнішньою поверхнею місця згинання.

Тріщини найчастіше спостерігаються при профілюванні заготовок з матеріалів, що важко деформуються. Затискачі (рис. 1, д) виявляються у вигляді потовщень на внутрішньому контурі при згинанні і найчастіше виникають у результаті нерівномірної деформації смуги у поперечному напрямку.

### **Матеріали, що застосовуються для виробництва гнутих профілів**

Матеріалами для виготовлення гнутих профілів служать низьковуглецеві та леговані сталі, кольорові метали та інші сплави. Крім того, можуть бути використані плаковані або біметалеві матеріали.

Матеріал, що обирається для виготовлення гнутих профілів, не повинен мати структуру вільного цементиту та різко виражену межу плинності, оскільки можлива поява тріщин у місцях згинання штаб, та поява брижів на поверхні готового профілю.

Матеріали, що застосовуються для виготовлення гнутих профілів у різних сферах, варіюються від рулонних сталей звичайної якості до кольорових металів, сплавів з різними типами покриттів і композитів.

### **Матеріали без покриття**

Невибагливими у технологічному відношенні є низьковуглецеві сталі, де вплив вуглецю визначається його структурою. Невеликі кількості розрізаних зерен цементиту та пластинчастого перліту не погіршують пластичних властивостей, у той час як наявність сітки структурно-вільного цементиту може різко знизити пластичність сталі, встановлену за ГОСТ 9045. Бал сітки повинен дорівнювати 2-3. Параметри твердості сталі істотно залежать від вмісту азоту (чим більше азоту, тим більша твердість). Деформованість у першому наближенні оцінюється відношенням межі плинності ( $\sigma_T$ ) до межі міцності ( $\sigma_B$ ). Рекомендовані значення ( $\sigma_T/\sigma_B$ ) матеріалів для профілювання складають 0,55-0,60, або визначаються величиною відносного видовження  $\delta_5$ .

Для виробництва гнутих профілів найчастіше застосовуються сталі марок: Ст. 2, Ст. 3, Ст. 4, Ст. 5, Ст. 6 (спокійні або киплячі), сталь 08 кп, сталь 10 кп, сталь 08Ю, сталь 09Г2, для яких склад, механічні характеристики, види постачання та

відповідні стандарти вказані в довідниках. В наведених марках сталей відносне видовження перевищує 20%.

Високоміцні алюмінієві сплави (В95, В93, 01420) і магнієві сплави (МА2-1, МА8), що деформуються, мають відносне видовження від 7% до 12%, алюмінієві сплави (АМцМ, АМг2М–Амг6М), що деформуються – 20%.

У титанових сплавів (ОТ4, ВТ5) величина відносного видовження розташовується у діапазоні від 10% до 15%.

Зазначені вище групи матеріалів мають до того ж істотну анізотропію властивостей, яка впливає не тільки на характеристики пластичності, але і на силові параметри процесу.

### **Матеріали з металевим покриттям**

В авіаційній промисловості широко застосовують плаковані алюмінієві сплави для виготовлення елементів фюзеляжу літального апарату. Чистий алюміній застосовується для плакування авіаційних сплавів, що деформуються. Сплав алюмінію з 1% цинку застосовується для міцних сплавів (В95). При використанні стисненого згинання для гнутих профілів малої висоти виникає порушення плакуючого покриття поблизу торців. Спостерігаються також дефекти, викликані значними контактними напруженнями, а також стискаючими напруженнями на внутрішньому контурі зони згинання. Зазначені дефекти пов'язані також з різницею механічних властивостей основного матеріалу та плакуючого шару.

Для захисту металу від корозії для металевих покриттів сталевих стрічки найчастіше застосовують цинк. Нанесення металевих покриттів на основі цинку певної товщини здійснюють гарячим або електролітичним способом. Оцинкована сталь, отримана з гарячого розплаву, має кращі захисні властивості, а покриття забезпечує значну адгезію і міцність у порівнянні з електролітичною сталлю. Саме тому близько 70% поверхонь цинкують з розплавів.

При формоутворенні порушення поверхні оцинкованої заготовки спостерігається при великих контактних напругах, а налипання (перенесення покриття на формуючі валки) – у разі незадовільної якості покриття вихідної заготовки. За умов, що передують втраті стійкості, на елементах профілю з'являються лінії Чернова-Людерса, які погіршують споживчі якості.

#### **Матеріали з органічним покриттям**

Для захисту металів від корозії частіше застосовуються органічні покриття. Вибір покриття повинен задовольняти таким вимогам: мала тривалість формування та сушіння покриття; високі фізико-механічні та декоративні властивості; достатня корозійна стійкість; стійкість до подальшої переробки матеріалу.

Зазначеним вимогам задовольняють покриття, що наносяться на рулонний матеріал, які можна поділити на: терморезистивні; термопластичні, що одержуються з рідкої фази; полімерні плівки.

В наш час практично всі лакофарбові матеріали, для фарбування листового та рулонного матеріалів, виробляють на основі синтетичних олігомерів та полімерів, що поділяються на три групи:

1) терморезистивні покриття (акрилові, поліефірні (ПЕ), епоксидні (ЕП));

2) термопластичні покриття (полівінілхлоридні пластизолі (ПЛ) та органозолі, а також кополімери вінілхлориду);

3) плівки (на основі полівінілхлориду (ПВХ), поліефірні матеріали, поліпропілен.

З багатьох характеристик полімерних матеріалів для процесів профілювання найбільший інтерес викликають характеристики кінцевого напівфабрикату (листа або стрічки). З вимог профілювання найважливішим серед фізико-механічних властивостей покриття є його еластичність, що дозволяє здійснювати згинання заготовки. Покриття покращують деформаційну здатність металу, зокрема,

за рахунок зниження тертя заготовки до поверхні інструменту, що дає можливість досягти значних ступенів деформації.

Для оцінки технологічності виготовлення того чи іншого профілю характеристики покриття повинні обов'язково братися до уваги.

#### **Висновки**

1. У роботі представлена класифікація дефектів гнутих профілів та перелік можливих причин їх виникнення.

2. Встановлено, що матеріалом для виготовлення гнутих профілів служать маловуглецеві та леговані сталі, кольорові метали та різні сплави, плаковані або біметалеві матеріали фарбовані, оцинковані та ін.

3. Для захисту основного металу сталевій стрічці від корозії найчастіше застосовують цинк. Нанесення металевих покриття на основі цинку певної товщини здійснюють гарячим або електролітичним способом.

4. Оцинкована сталь, отримана з гарячого розплаву, має кращі захисні властивості (покриття має кращу адгезію і міцність) у порівнянні з електролітичною сталлю, тому близько 70% поверхонь цинкують з розплавів.

5. Покриття суттєво покращують деформаційну здатність металу за рахунок зниження тертя заготовки по поверхні інструменту, що надає можливість досягнення великих ступенів деформації.

#### **Список використаних джерел / References**

1. Erfani Moghadam A. Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles. Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, *Institute for Frontier Materials Deakin University*, 2017. 159 p.

2. Halmos T. Roll Forming Handbook. Edited by George T. Halmos Boca Raton: Taylor&Francis. 2006. 583 p.

3. Zhao W. Finite element analysis and fracture forecast of U channel flexible roll forming. *Adv Mat Res.* 683. 2013. P. 604-607.

4. Kasaei M.M., Moslemi Naeini H., Liaghat G.H. Revisiting the wrinkling limits in flexible roll forming. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design.* Vol. 50(7). 2015. P. 529-541.

5. Halmos T. Roll Forming Handbook. Boca Raton: Taylor&Francis. 2006. 583 p.

6. Mahajan P. FE Simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties. *Steel Research International.* 2018. Vol. 89, No. 5.

7. Halmos T. Roll Forming Handbook. Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. 583p.

8. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in rollforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2017. Vol. 88, No. 9–12. P. 2405-2415.

## **PREDICTION OF DEFECT APPEARANCE IN ROLLED SHAPES**

O. I. Kurando, Yu.O. Pliesnetsov,  
S. Yu. Pliesnetsov

National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute";  
2 Кирпичова Ст., Kharkiv, 61002, Ukraine;  
e-mail: [serhii.pliesnetsov@khpi.edu.ua](mailto:serhii.pliesnetsov@khpi.edu.ua)

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 681.5.073

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-23-32

### GUIDED WAVE RADAR LEVEL SENSORS: CALIBRATION AND ENVIRONMENTAL IMPACTS

*O. V. Zivenko, A. Yu. Hrieshnov, Yu. D. Zhukov*

*Marine Instrumentation Department, Educational and Scientific Institute of Automation and Electrical Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding,  
Central Ave, 3, Mykolaiv, 54029, Ukraine; e-mail: [oleksii.zivenko@nuos.edu.ua](mailto:oleksii.zivenko@nuos.edu.ua)*

This study presents a detailed uncertainty analysis for guided wave radar level sensors, focusing on the calibration schemes and environmental influence factors. Guided wave radar level sensors are used in numerous industrial applications, especially for harsh environmental conditions. While some of the sensors are designed for technological operations control and do not require extreme precision levels, there are applications where a high level of precision is crucial. The analysis highlights the impact of environmental factors, such as temperature, pressure, and air humidity, on measurement accuracy and calibration effectiveness. Key uncertainty contributions—including those from reference instruments, random noise (signal-to-noise ratio impact), nonlinearity, and dielectric constant variability—are assessed under reference and extended environmental conditions. Results demonstrate that under controlled environments, measurement uncertainties remain within acceptable thresholds. However, when significant environmental variability is introduced, contributions from dielectric constant changes and time estimation noise amplify uncertainty bands, especially for long-range measurements. Practical calibration recommendations are provided to maintain measurement accuracy in controlled and harsh operational conditions. Additionally, the study compares scenarios using high-accuracy calibration setups with cost-effective alternatives for non-critical applications. These comparisons guide sensor manufacturers and metrological regulators in optimizing calibration practices while balancing cost and performance. The findings underscore the importance of compensating for dielectric constant variability in dynamic environments. Future work should explore uncertainty reduction techniques, including real-time correction. The provided insights are instrumental for improving polymeric sensor systems and ensuring reliable level measurements in diverse applications, fostering advancements in industrial automation and process control.

**Keywords:** measurement uncertainty, calibration, guided wave radar level sensor, dielectric permittivity.

Проведено детальний аналіз невизначеності для хвилеводні радарні рівнеміри, зосереджуючись на схемах калібрування та впливі факторів навколишнього середовища. Хвилеводні радарні рівнеміри широко застосовуються в промисловості, особливо в умовах жорстких експлуатаційних середовищ. Частина таких сенсорів призначена для технологічного контролю і не потребують високого рівня точності, тоді як інші застосування вимагають надвисокого рівня точності. У дослідженні розглянуто вплив факторів навколишнього середовища, таких як температура, тиск і вологість повітря, на точність вимірювань та ефективність калібрування. Проаналізовано компоненти невизначеності включно з похибками еталонних інструментів, випадковими некомпенсованими флуктуаціями результатів вимірювань, нелінійністю функції перетворення та варіативністю діелектричної проникності. Аналіз виконано для еталонних умов і розширеного діапазону умов навколишнього середовища. Результати показують, що невизначеність вимірювань залишається в межах допустимих норм для малих контрольованих відстаней та референсних умов експлуатації. Однак, за умов значної мінливості навколишнього середовища, зміни діелектричної проникності та шуму в оцінці часу значно збільшують загальну невизначеність, особливо для вимірювань на великих відстанях. Наведено практичні рекомендації щодо підтримання точності вимірювань для різних умов експлуатації. У статті наведено порівняння сценаріїв використання високоточних калібрувальних стендів із альтернативами відносно низької вартості, придатними для некритичних застосувань та забезпечення рівня невизначеності типової для технологічного контролю. Такі порівняння є корисними як для виробників сенсорів, так і для метрологічних служб підприємств або регуляторних установ для оптимізації підходів до калібрування, балансує між вартістю та продуктивністю. Результати дослідження

підкреслюють важливість компенсації варіативності діелектричної проникності для застосувань зі значними змінами умов експлуатації. Перспективною тематикою подальших досліджень є розробка методів зменшення невизначеності, включно з дослідженням невизначеності за умов введення корекцій. Наведені моделі та висновки є цінними для вдосконалення поліметричних систем, забезпечуючи надійність вимірювань рівня в різноманітних застосуваннях і сприяючи розвитку промислової автоматизації та управління технологічними процесами.

**Ключові слова:** невизначеність вимірювань, калібрування, радарний датчик рівня направленої дії, діелектрична проникність.

## Introduction

Accurate measurement of liquids and solids levels is essential for standard industrial processes [1]: controlling storage tanks, ensuring precise filling in production lines, preventing overflows or dry running, and complying with stringent safety and environmental regulations. The reliability and precision of level sensors directly impact operational efficiency and product/process quality in industries such as oil and gas, food and beverage, chemical and energy, and manufacturing.

The quality of level sensing can be characterized by accuracy, repeatability, resolution, response time, and the influence of different environmental factors on the measurements. Measurement uncertainty or maximum permissible error (MPE) are critical concepts considered for several applications, such as warehouse monitoring, technological overflow protection, or safety-related applications. Uncertainty represents confidence in a measurement result, often defined by statistical analysis, while MPE refers to the maximum allowable deviation from the true (actual) value during operation. Understanding and minimizing uncertainties makes processes reliable and allows using results of such measurements for specific purposes, e.g., custody transfer applications. This article focuses on guided wave radar (GWR) sensors, which leverage electromagnetic energy for precise level measurement. GWR sensors can operate effectively in various liquids and under extreme environmental conditions. While radar-based sensors are notable for their non-contact operation, which minimizes contamination risks, GWR sensors stand out for applications demanding high precision, such as monitoring liquids with low

permittivity or in pressurized vessels. Another advantage of GWR sensors is their ability to work as a polymeric system, enabling simultaneous measurement of multiple parameters, such as level, temperature, and pressure, using a single device. However, achieving and sustaining such accuracy necessitates a meticulous calibration process and corresponding techniques. This process ensures traceability, enhances accuracy and provides consistent performance.

A calibration procedure aligns a sensor's output to a known standard or reference. This involves adjusting measurements for level sensors to reflect accurate product levels under controlled conditions.

Calibration can establish/correct the measurement scale during manufacturing and test the accuracy and performance throughout the sensor's lifecycle. By using appropriate reference standards, calibration enables the tuning of sensors during production. It verifies the sensor's performance under standard or specific required conditions if a predefined calibration table is available.

This article addresses the calibration of GWR sensors, examining the impact of dielectric permittivity variations under reference and non-reference environmental conditions. It then makes recommendations to reduce measurement uncertainty, which is valuable for manufacturers, end-users, and regulators.

**The main objective** of this study is to analyze the influence of the environmental factors under reference and non-reference conditions and to

1 evaluate the uncertainty in level estimation across extended environmental conditions for particular level sensor and calibration procedures;

2 propose recommendations for sensor manufacturers, end-users, and independent evaluators on reducing measurement uncertainty.

**Literature review and analysis.** It's essential to consider a measurement model and corresponding calibration scheme to highlight possible sources of uncertainties. A typical GWR level sensor uses a widely known time domain reflectometry principle [3-9]; the simplified measurement model is described by Eq. (1):

$$L = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon}} t. \quad (1)$$

where  $L$  – distance from generator/receiver of electromagnetic pulses;  $c$  – speed of light in vacuum;  $\varepsilon$  – dielectric constant of the vapor phase of a product through which the electromagnetic pulse propagates;  $t$  – the time delay between moments of sounding and receiving the reflected pulse; the coefficient of  $\frac{1}{2}$  stands for the fact that the electromagnetic pulse propagates along double the length of the probe (forward and backward).

In this case, the main feature that estimates distance  $L$  is the time delay  $t$  (if the vapor's dielectric constant is considered a constant).

However, sources [10-13] show significant variability in the dielectric constant of air (or correlated parameters under changing environmental conditions). Limited focus has been given to how these variations propagate into measurement uncertainty as this influence is traditionally considered as  $t$ . This leads to a need for appropriate corrections both for calibration and measurement stages to reduce the overall uncertainty. For example, some known correction techniques consider changes in the dielectric constant of the media, especially when working with vessels under high pressures [14-16]. It's worth noting that some of these techniques use dynamic or online correction based on reference knowledge about distances or time-of-flight. In contrast, others require the direct use of provided correction coefficients and uncertainty measures. Independent of the technique applied, understanding the

reference uncertainty after initial calibration is crucial for calculating the total uncertainty for a specific application.

**Methodology.** The calibration process for level sensors is typically performed under reference conditions, as defined for accurate sensors in [17]. National reference standards are employed for the most precise calibrations, such as the Ukrainian National Standard of the Unit of Length for the Liquid Level (DETU 03-02-15) [18]. This standard reproduces the unit of length based on the global constant—the speed of light in a vacuum—and achieves an extended uncertainty of  $U_{NS}=\pm 0.3$  mm over a range of 0 to 20 meters. Using interferometers enables highly accurate distance measurements, with the transfer of the unit of length to high-precision level meters conducted via direct comparison.

However, equipment manufacturers employ their own calibration setups due to the costliness and timings of the complete calibration cycle with national standards. These setups are optimized for their specific technological processes and are generally less accurate than national standards but more practical and cost-effective for routine operations. For instance, the calibration setup at AMICO Group is an example of such an approach. Fig. 1 illustrates the calibration setup used in this study, along with its simplified design and working scheme. Figure 1 illustrates the components of the calibration setup for level sensors:

- Level Sensors Calibration Complex (LSCC): control system managing the calibration process.
- Reference Measurement (RM) Instruments: Equipment responsible for the reference level estimation: laser rangefinder + magnetic encoders-based system to measure the position of the reference plate or reflector;
- Reference Plate (RP): reference plate or reflector.
- Additional Reference Instruments (ARI): temperature, pressure, and humidity sensors distributed in the measurement zone. They allow temperature and humidity to be

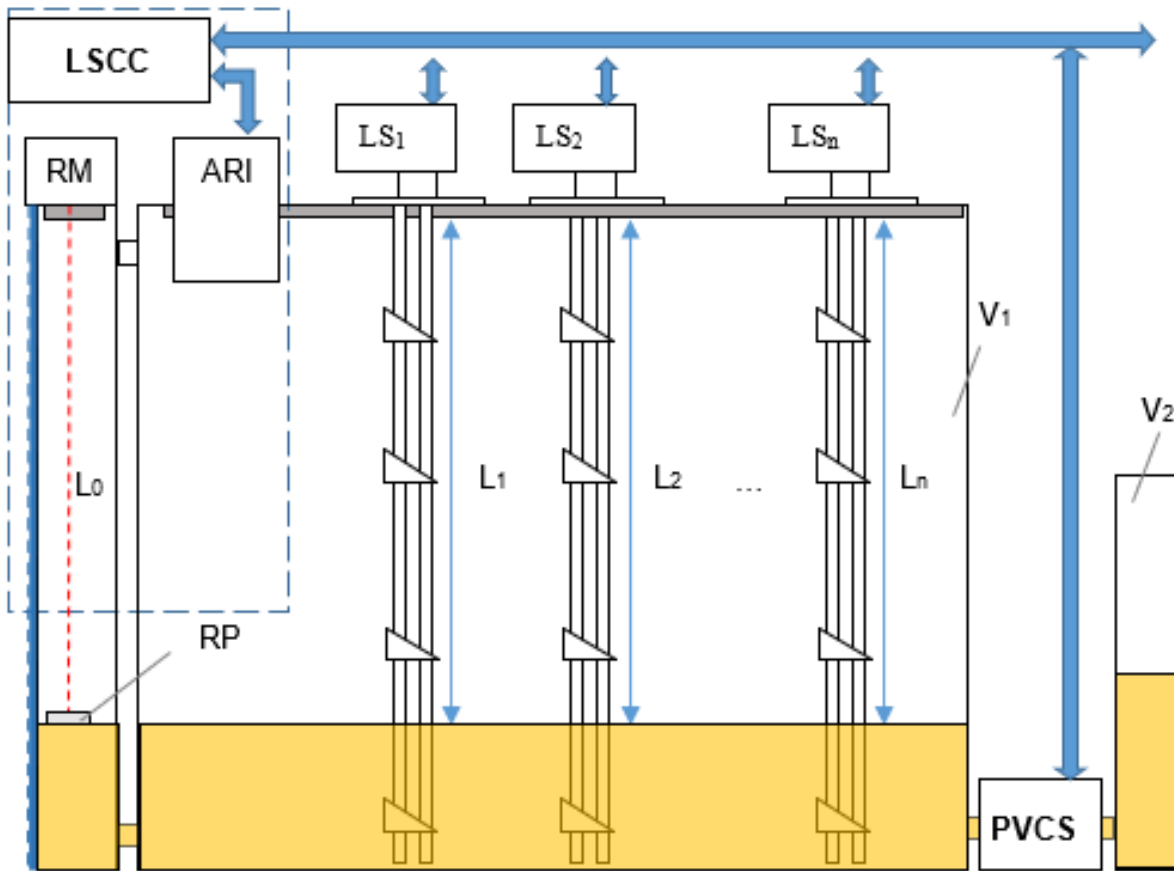


Figure 1 – Structural Diagram of a Calibration Stand for Evaluation and Tuning of Level Sensors

measured at multiple points along the sensing axis of level sensors and the temperature of liquids.

- Pumps and Valves Control Subsystem (PVCS): This subsystem regulates the flow and level of the liquid in the calibration setup;
- Level Sensors under test ( $LS_1..LS_n$ ): The sensors are being calibrated.
- Vessels with controllable liquid (V1, V2): These reservoirs store liquid and set a specific liquid level during calibration.

The reference measurement instrument (RM) relies on a precision reflector for accurate operation. During a single calibration cycle, several level sensors can be calibrated simultaneously. The procedure involves repeated measurements, capturing the readings from the level sensors under test and those from the reference instrument RM. At the same time, all the environmental parameters are monitored to satisfy the requirements of the particular procedure.

The distance (level) measurement reference instrument has an extended uncertainty of  $\Delta L_{RM} = 0.4$  mm. Temperature sensors in the calibration complex have extended uncertainty  $\Delta T = 0.5$  °C,  $\Delta P = 1$  kPa for pressure and  $\Delta RH = 2.5$  % for relative humidity.

**Environmental Influence.** The study considers the following reference conditions:

- Temperature ( $T$ ) in  $[15, 25]$  °C.
- Relative Humidity ( $RH$ ) in  $[40, 80]$  %.
- Pressure ( $P$ ) in  $[86, 106]$  kPa.

Values for dielectric permittivity can be interpolated using experimental tabular data [12] or applying known equation [13]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_0 \cdot 211}{T} \left( P + \frac{48 \cdot P_s}{T} \cdot RH \right) \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

where  $\varepsilon_0$  is the permittivity of vacuum,  $T$  is the absolute temperature (K),  $RH$  is the relative humidity (%),  $P$  (mm Hg) is the pressure of the air, and  $P_s$  (mm Hg) is the

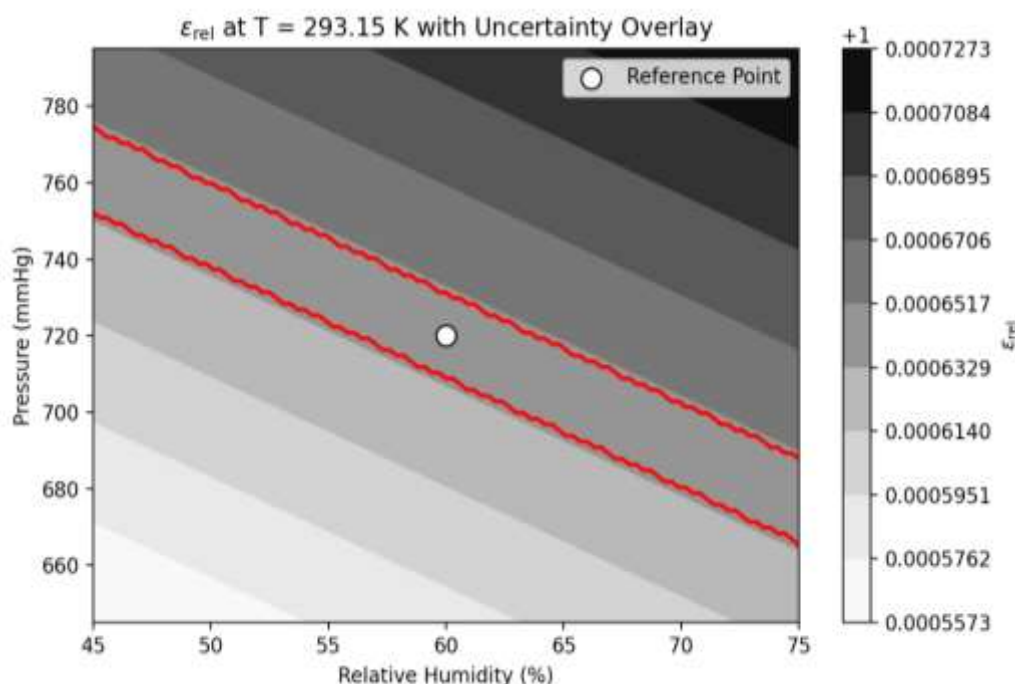


Figure 2 – Dielectric constant of air depending on humidity value and pressure for a fixed temperature value

pressure of saturated water vapors at the temperature  $T$ .

**Uncertainty Propagation.** The effect of the changes in  $\varepsilon_{\text{air}}$  on the distance estimation  $\Delta L_\varepsilon$  can be roughly assessed by substituting (2) into the relation for the level estimation (1).

$$\Delta L_\varepsilon = \left| \frac{\partial L}{\partial \varepsilon} \right| \cdot \Delta \varepsilon = \left| -\frac{ct}{4\varepsilon^3 / 2} \right| \cdot \Delta \varepsilon, \quad (3)$$

where  $\Delta L_\varepsilon$  is the contribution of the uncertainty in distance estimation due to uncertainty in the dielectric permittivity value  $\Delta \varepsilon$ . Two main approaches to define  $\Delta \varepsilon$  depend on the measurement mode used. The first mode is the most widely used, and it assumes no corrections if the measurements are performed within specified ranges of pressure, humidity, and temperature without applying any corrections for environmental conditions. In this case, the maximum uncertainty in permittivity is defined by the maximum difference in dielectric permittivity values within the given ranges. This approach assumes a worst-case scenario where no compensations for environmental influences are applied, potentially leading to higher uncertainty in distance estimation.

The second approach assumes that the sensor is applying corrections depending on the data about the dielectric constant and uncertainty or based on the environmental conditions and model provided. In this case, the dielectric constant is recalculated for air using Equation (2). The uncertainty in  $\Delta \varepsilon$  can then be propagated through the uncertainties of the reference measurements. In this case, corrections are applied to account for the influencing factors, reducing the overall uncertainty in distance estimation and calibration. However, the resulting  $\Delta \varepsilon$  depends on the accuracy and reliability of the reference instruments used.

It is essential to assess the impact of these factors on the uncertainty in level estimation, considering the trade-off between simplicity, where measurements are taken without additional corrections, and improved accuracy, achieved by applying corrections. Based on the specified reference conditions within the given ranges, the variation analysis reveals the following results for the dielectric constant of air. The minimum value,  $1.000543 \pm 0.000007$ , occurs under 45.00% relative humidity, a temperature of 15.0°C,

and a pressure of 645 mmHg. The maximum value,  $1.000766 \pm 0.000010$ , corresponds to conditions of 75.0% relative humidity, a temperature of 25.0°C, and a pressure of 795 mmHg. The Arden Buck equations were applied to calculate the saturation vapor pressure  $P_s$  to temperature for moist air [21].

The stated uncertainty interval is derived from uncertainty propagation using Equation (2), based on the uncertainties of the reference sensors for temperature, pressure, and humidity. It's worth noting Figure 2 shows an example of the dielectric constant dependence for some fixed temperature values while varying the pressure and humidity of the air as a media of wave propagation.

Figure 2 also shows a point with the dielectric constant value corresponding to given reference conditions and a region where the dielectric constant lies within the calculated uncertainty region.

It's necessary to consider additional sources of uncertainty to consistently analyze the contribution to the measurement process. Related to simplified Equation (1), the uncertainty comes from uncertainty in time estimation  $\Delta t_R$  and uncertainty in distance measurement, which comes from the reference measurement instrument  $\Delta L_{RM}$ . Several factors, including the sounding pulse shape and the signal-to-noise ratio, influence uncertainty in time estimation. These characteristics vary for each specific sensor and play a critical role in determining the accuracy of time measurement.

This uncertainty component generally depends on the distance between the sensor and the measured surface (or reflector). As the electromagnetic wave propagates, the shape of the reflected pulse changes with distance, introducing additional variability in the time measurement (the amplitude of the reflected signal decreases with the increase in distance, decreasing the signal-to-noise ratio). To model this dependency, the uncertainty in time estimation  $\Delta t_R$  can be expressed as a function of the distance  $L$ . A practical approach is to approximate this relationship using an exponential curve:

$$\Delta t_r(L) = A \cdot \exp(B \cdot L), \quad (4)$$

where  $L$  is the distance between the generator and interface air-liquid (or reflector), parameters  $A$  and  $B$  are determined during the calibration process based on the sensor's characteristics and its operating conditions.

The calibration function is usually stored in a tabular form, and level calculation is done according to Equation (5):

$$L = L_{c,i} + \frac{L_{c,i+1} - L_{c,i}}{t_{c,i+1} - t_{c,i}} \cdot (t - t_{c,i}), \quad (5)$$

where  $t_{c,i} \leq t \leq t_{c,i+1}$ , – measured delay between sounding and reflected pulses;  $L_{c,i}, L_{c,i+1}$ , – corresponding data about distances saved in the calibration table.

The following contributing factors were considered to analyze measurement uncertainty:

**Nonlinearity between Calibration Points:** Hardware tolerances in the guidewave system introduce a nonlinearity of up to  $\pm 0.3$  mm, representing the maximum permissible deviation between two calibration points. This is a fixed contribution for each segment of the calibration table.

**Random Error in Time Estimation  $\Delta t_R$ .** The random error in time measurement varies with the distance  $L$  and is modelled using noise analysis on the experimental data. The uncertainty in time estimation is calculated using Equation (4) and is distance-dependent, accounting for the degradation of the signal-to-noise ratio with increasing distance.

**Uncertainty of the Reference Instrument:** The accuracy of the reference device used during the calibration procedure directly impacts the calibration uncertainty. This contribution is considered fixed.

**Uncertainty Due to Changes in Dielectric Constant:** Variations in environmental conditions affect the propagation time of the electromagnetic pulse, introducing additional uncertainty, and this can be simulated using Equation (6), which propagates uncertainty in the dielectric constant into uncertainty in time estimation due to difference in dielectric constant:

$$\Delta t_{\varepsilon}(L) = \left| \frac{L}{c\sqrt{\varepsilon}} \right| \cdot \Delta\varepsilon, \quad (6)$$

Using Equations (2), (5), and (6) along with the uncertainty propagation model, the contributions from each factor were analyzed. The results of these calculations are presented and discussed in the next section of this article, providing insights into the impact of each uncertainty component on the overall measurement reliability and quality.

Figure 3 provides a comprehensive view of these findings, highlighting the interplay of uncertainty contributions from reference instruments, time noise, nonlinearity, and dielectric constant variability under various environmental scenarios. Figure 3a highlights results for Reference Conditions without considering additional variability of the dielectric constant.

The uncertainty band is calculated under reference environmental conditions  $RH = 60 \pm 2.5\%$ ,  $T = 20 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 96 \pm 1\text{kPa}$ . These conditions assume minimal variation in the dielectric constant of air. The measurement uncertainty for this case remains within the 1 mm band for distances up to 16.5 meters for the given setup and sensor characteristics. The uncertainty contributions from individual sources remain balanced, with no dominant contributor. This scenario is representative of controlled environments where variations in temperature, pressure, and humidity are minimal.

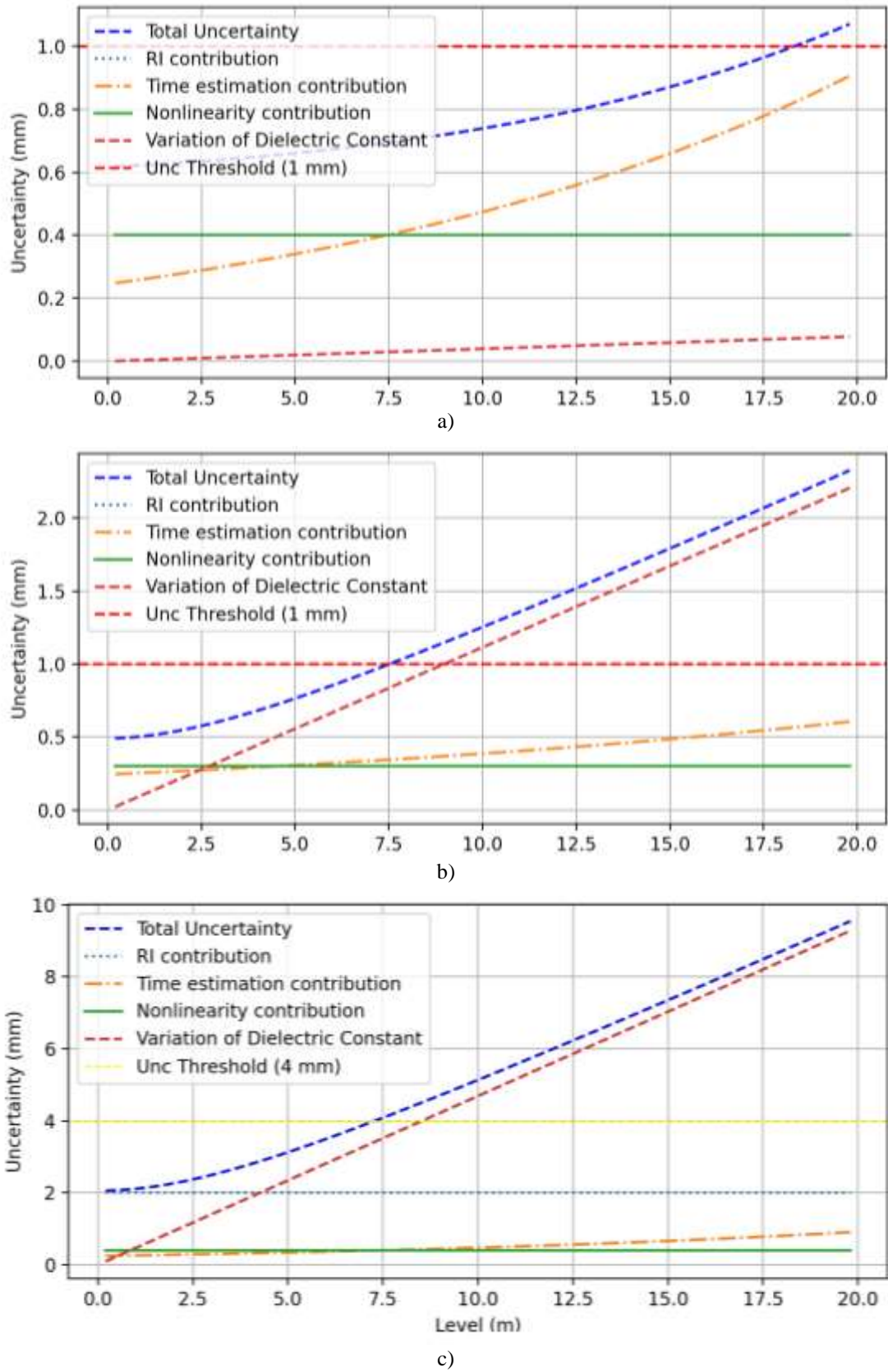
Figure 3b explores the impact of the maximum allowed variability in environmental conditions within the specified reference range ( $T \in [15, 25]^{\circ}\text{C}$ ;  $RH \in [40, 80]\%$ ,  $P \in [86, 106]\text{kPa}$ ). Variations in the dielectric constant for this case significantly expand the uncertainty band, especially at greater distances from the level interface. The effect of distance amplifies this uncertainty as the time delay becomes more sensitive to changes in dielectric constant at longer distances. This result shows the importance of accounting for environmental variability during the calibration and measurement phases. Figure 3c demonstrates results for extended practical conditions. For those  $T \in [-20, 55]^{\circ}\text{C}$ ;

$RH \in [20, 90]\%$ ,  $P \in [50, 120]\text{kPa}$ . The uncertainty band increases substantially, which reflects the influence of more considerable variations in dielectric permittivity. Figure 3c also shows the application of a low-accuracy reference instrument ( $\Delta L_{RM} = 2\text{ mm}$ ), which results in higher uncertainty while simplifying the calibration procedure and reducing timings and costs, making it suitable for many practical applications where precision requirements are less stringent.

Figure 3a shows that the uncertainty contributions from time measurement and dielectric constant variation at short distances are relatively small, while the nonlinearity between calibration points becomes more noticeable. The multiplicative effect of dielectric constant variation dominates the total uncertainty at longer distances. Corrective actions, such as dynamic compensation, are critical for those cases, and their efficiency should be researched additionally.

In a controlled environment, uncertainty levels are well within the acceptable threshold. However, incorporating dielectric constant corrections becomes essential for broader environmental variability and distances (Figures 3b, 3c) to maintain accuracy, particularly for long-range measurements. For relatively small ranges (up to 5 m), even mid-accurate calibration systems can be used to enable the required levels of accuracy. In contrast, complex high-accuracy reference equipment must be used for long-range distances and precision applications.

**Conclusions.** The presented results highlight the calibration scheme's effectiveness under controlled conditions and recommend appropriate reference instruments. Detailed uncertainty estimations were performed, providing numerical results for various combinations of uncertainty sources. These results help to understand each factor's relative impact and significance, guiding improvements in sensor calibration.



**Figure 3 – Uncertainty Estimation Results for GWR Level Sensor:  
 Analysis of Contributions and Key Components Across Various Environmental Scenarios**

Comparisons across varying conditions demonstrate the critical role of controlling humidity, pressure and temperature to provide necessary corrections. For small-range sensors, calibration setups can be relatively simple and cost-effective. However, increasing the measurement range leads to a nonlinear rise in complexity and associated costs. The study highlights the significance of future efforts in assessing uncertainty, both with and without dynamic correction for environmental variations, especially in applications functioning under highly variable conditions. The analysis supports further enhancement of polymetric sensors utilizing GWR, enabling advanced signal processing for maximum information extraction..

### References

1. Zivenko, A.V., Nakonechniy, A.G., & Motorkin, D.Y. Level measurement principles & sensors. *Materialy IX mezinarodni vedecko-practicka conference "Veda a technologie: krok do budoucnosti - 2013"*. 2013. Dil. 28, Technicke vedy, Prague, 85–90.
2. Zhukov, Yu.D., & Zivenko, O.V. Intelligent polymetric systems industrial applications. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Information-Communication Technologies & Embedded Systems (ICTES 2020)*. 2020. Mykolaiv, Ukraine, P. 122–137. Available: <https://www.ceur-ws.org/Vol-2762/paper8.pdf>.
3. Fellner-Feldegg, H. Measurement of dielectrics in the time domain. *The Journal of Physical Chemistry*. 1969. Vol. 73(3), P. 616–623. DOI: [10.1021/j100723a023](https://doi.org/10.1021/j100723a023)
4. Topp, G.C., Davis, J.L., & Annan, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*. 1980. Vol.16(3), P. 574–582.
5. Robinson, D.A., & Friedman, S.P. A method for measuring the solid particle permittivity or electrical conductivity of rocks, sediments, and granular materials. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003. Vol. 108(B2), 2076. DOI:[10.1029/2001JB000691](https://doi.org/10.1029/2001JB000691)
6. Nemarich C. P. Time domain reflectometry liquid level sensors. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2001. Vol. 4(4). P. 40–44.
7. Hollywood P.M. TDR level measurement. *Measurement & Control*. 1997. Vol.31(6). P. 94–98.
8. Cataldo A., Tarricone L., Attivissimo F., Trotta A. Simultaneous measurement of dielectric properties and levels of liquids using a TDR method. *Measurement*. 2008. Vol. 41(3), P. 307–319. DOI: [10.1016/j.measurement.2006.11.006](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2006.11.006)
9. Younglove, B.A. Dielectric constant of compressed gaseous and liquid oxygen. *Journal of Research of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry*. 1972. Vol. 76A(1), P. 1–10.
10. Huang P.H., Ripple D.C., Moldover M.R., Scace G.E. A reference standard for measuring humidity of air using a re-entrant radio frequency resonator. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Humidity and Moisture (ISHM 2006)*. 2006. Rio de Janeiro, Brazil.
11. Chattopadhyay, R. An empirical formula for computing the dielectric constant of humid air. *ResearchGate*. 1997. Available: <https://www.researchgate.net/publication/262040448>.
12. Santo Zarnik, M., & Belavic, D. An experimental and numerical study of the humidity effect on the stability of a capacitive ceramic pressure sensor. *Radioengineering*. 2012. Vol. 21(1), P. 201–206.
13. Zhukov Y.D., Zivenko A.V., Gudyma I.A., Raieva H.N. Correction technique for guided wave radar LPG level measurement sensors. *Shipbuilding and Marine Infrastructure*. 2019. Vol. 2(12), P. 27–34. DOI: [10.15589/smi2019.2\(12\).3](https://doi.org/10.15589/smi2019.2(12).3)
14. Emerson Rosemount. *Technical Note: Using Guided Wave Radar for Level in High Pressure Steam Applications*. 2019. Available: <https://www.emerson.com/documents/automation/technical-note-using->

[guided-wave-radar-for-level-in-high-pressure-steam-applications-rosemount-en-76264.pdf](#).

15. Chegrinec, V.N. Correction of the transformation function of a level measurement by means of the polymetric information system. *Vimiryuvalna ta Obchislyuvalna Tekhnika v Tekhnologichnikh Protsesakh*. 2013. Vol. 2. P. 33–38. [in Ukrainian]

16. International Organization of Legal Metrology (OIML). *OIML R 85-1 & 2: Automatic level gauges for measuring the level of liquid in stationary storage tanks*. Paris, France: Bureau International de Métrologie Légale (BIML) 2008.

17. State Primary Standard of the Unit of Length for the Liquid Level. URL: <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=347&L=2>. Accessed: [29.11.2024].

18. Zivenko O., Nakonechnyi A., Motorkin D., Gudyma E. Automated calibration of level channels in polymetric systems considering the temperature of the electronic unit. *Innovations in Shipbuilding and Ocean Engineering: Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference*, Mykolaiv: National University of Shipbuilding. 2013. P. 424–427. [in Ukrainian]

19. Nakonechnyi A.G., & Zivenko A.V. Automation of calibration of level measurement channels in polymetric systems. *Innovations in Shipbuilding and Ocean Engineering*, Proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 95th Anniversary of Admiral Makarov National University of Shipbuilding. Mykolaiv: National University of Shipbuilding. 2015. P. 337–340. [in Ukrainian]

20. Buck Research Instruments. *Buck Research CR-1A User's Manual, Appendix 1*. 1996.

### ХВИЛЕВОДНІ РІВНЕМІРИ: КАЛІБРУВАННЯ ТА ВПЛИВ УМОВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

О. В. Зівенко, А. Ю. Грешнов, Ю. Д. Жуков

Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова;  
просп. Центральний 3, м. Миколаїв, 54029, Україна;  
e-mail: [oleksii.zivenko@nuos.edu.ua](mailto:oleksii.zivenko@nuos.edu.ua)

УДК 697.85, 004.4

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-33-45

## ПРОВЕДЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ В ДІАПАЗОНІ ОБ'ЄМНОЇ ВИТРАТИ ГАЗУ ДО 25 000 М<sup>3</sup>/ГОД В РАМКАХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ

*В. В. Малісевич, Д. О. Середюк, Ю. Т. Пелікан, В. Б. Катамай*

*Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»; вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, 76006, Україна;  
e-mail: [ifstandartmetrology@gmail.com](mailto:ifstandartmetrology@gmail.com)*

У статті описано розробку робочого еталону для повірки та калібрування лічильників і витратомірів газу в діапазоні об'ємних витрат газу від 1 м<sup>3</sup>/год до 25 000 м<sup>3</sup>/год. Основна мета розробки - створення робочого еталону (установки), яка простежуватиметься до національного еталону України та забезпечить високу достовірність вимірювань та відповідність сучасним технічним і метрологічним стандартам. Вибір принципу роботи проведений на основі аналізу існуючих типів установок, включно з установками дзвонового типу, поршневыми установками, установками PVTt-типу, сопловими установками та установками на базі еталонних лічильників газу. Врахувавши їх переваги, недоліки та обмеження, було обрано тип установки, що дає змогу ефективно вирішувати поставлені задачі. Дана установка базується на багатолінійній системі еталонних лічильників турбінного та роторного типів, яка може забезпечити відповідну метрологічну простежуваність і дасть можливість розширити діапазон відтворюваних витрат існуючої еталонної бази України. Застосування багаторівневої системи регулювання витрат газу, яка реалізована на частотному управлінні обертами двигунів та позиційному регулюванні запірної арматури, дає можливість задавати та стабілізувати витрати на різних режимах роботи установки. Важливим аспектом розробки є застосування сучасних алгоритмів розрахунку, які враховують вплив температури, тиску на зміну об'єму під час дослідження. Крім того, програмне забезпечення установки інтегрує вимоги сучасних методик повірки лічильників турбінного, роторного, ультразвукового типів та лічильників із вбудованими перетворювачами об'єму. Це забезпечує автоматизацію процесів роботи установки та формування відповідних електронних протоколів повірки. Результати експериментальних досліджень підтвердили високу ефективність обраного типу установки і актуальність розробки. Дана установка здатна працювати в широкому діапазоні витрат, а саме від 1 м<sup>3</sup>/год до 25 000 м<sup>3</sup>/год, що робить її унікальним рішенням для метрологічного забезпечення промислових лічильників газу. Також відзначається потенціал для міжнародної інтеграції та подальшого визнання вимірювальних та калібрувальних можливостей в ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» на міжнародному рівні.

**Ключові слова:** Об'єм та об'ємна витрата газу, простежуваність, робочий еталон, повірочна установка, повірка, калібрування.

The article describes the development of a working standard for the verification and calibration of gas meters and flowmeters within a volumetric gas flow range from 1 m<sup>3</sup>/h to 25,000 m<sup>3</sup>/h. The primary goal of the development is to create a working standard (facility) traceable to the national standard of Ukraine, ensuring high measurement accuracy and compliance with modern technical and metrology standards. The principle of operation was selected based on an analysis of existing types of facilities, including bell-type systems, piston systems, PVTt-type systems, nozzle systems, and systems based on reference gas meters. Considering their advantages, disadvantages, and limitations, a facility type was chosen that effectively addresses the set objectives. It is based on a multi-line system of reference turbine and rotary meters, which provides the necessary metrological traceability and allows for an expanded range of flow rates compared to the existing reference base of Ukraine. The use of a multi-level gas flow control system, implemented through frequency control of motor speed and positional regulation of shut-off valves, allows for setting and stabilizing flow rates across different operating modes of the facility. An important aspect of the development is the application of modern calculation algorithms that consider the effects of temperature and pressure on volume changes during testing. Additionally, the facility's software integrates the requirements of current verification methodologies for turbine, rotary, ultrasonic meters, and meters with built-in volume converters. This ensures the automation of the facility's operations and the generation of corresponding electronic verification protocols. The results of experimental studies confirmed the high efficiency of the selected facility type and the relevance of the development. This facility can operate over a wide range of flow rates, from 1 m<sup>3</sup>/h to 25,000 m<sup>3</sup>/h, making it a unique solution for the metrological support of industrial gas meters. Moreover, it highlights the

potential for international integration and further recognition of the measurement and calibration capabilities of SE "IVANO-FRANKIVSKSTANDARTMETROLOGY" at the international level.

**Keywords:** Gas volume and volumetric flow, traceability, working standard, verification facility, verification, calibration.

### **Вступ**

Облік природного газу є однією з ключових складових сучасної енергетичної системи, адже цей ресурс відіграє критично важливу роль у промисловості, енергетиці, комунальному господарстві та побутовому секторі. У світі, де постійно зростає попит на енергоресурси та їх вартість, забезпечення достовірності та прозорості в обліку спожитого газу є критично важливим завданням, що напряму впливає не тільки на економіку в цілому, але і на кінцевого споживача. Це питання охоплює широкий спектр аспектів - від технічних рішень до економічної ефективності, оптимізує використання ресурсів і забезпечує прозорість у розрахунках.

Сучасні системи обліку газу повинні відповідати високим технічним і метрологічним стандартам, забезпечуючи достовірність вимірювань за будь-яких умов експлуатації. Надійний облік газу має важливе значення не лише для економіки України, підприємств, які видобувають, зберігають, транспортують та споживають цей ресурс, але й для звичайних споживачів газу. Ефективний облік газу не лише знижує витрати, але й сприяє формуванню відповідальної енергетичної політики для сталого економічного розвитку та європейської інтеграції України.

Це питання особливо актуальне в умовах підвищення цін на енергоносії, необхідності зменшення технічних втрат та реалізації стратегії енергоефективності, що стоїть перед багатьма країнами світу. У цьому контексті вивчення механізмів, технологій і підходів до обліку газу набуває першочергового значення.

У промисловості, де обсяги споживання газу можуть сягати значних масштабів, особливо важливу роль відіграють промислові лічильники газу

великого діаметра. Лічильники газу діаметром від DN300 до DN500 є частиною газотранспортної системи України, які вже використовуються в газорозподільних станціях, нафтогазових підприємствах та великих промислових об'єктах для обліку при транспортуванні газу у магістральних і розподільних мережах. Високоточні промислові лічильники забезпечують не лише надійний контроль обсягів споживання, але й сприяють зниженню втрат та оптимізації обліку природного газу. Застосування таких лічильників дозволяє вимірювати значні обсяги газу при застосуванні мінімальної кількості засобів та допоміжного обладнання.

У цьому контексті важливою є належна метрологічна база, яка дозволить на відповідному рівні проводити роботи з повірки, випробування та калібрування лічильників газу діаметром понад 300 мм.

**Мета роботи** - Здійснити розробку та проектування робочого еталону одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні від 1 м<sup>3</sup>/год до 25000 м<sup>3</sup>/год, який буде простежуватися до національних еталонів України, що мають міжнародно визнані вимірювальні та калібрувальні можливості для забезпечення високої довіри та достовірності вимірювань у відповідності до міжнародних стандартів.

### **Аналіз існуючих установок**

Робочі еталони (установки) для повірки, випробування та калібрування лічильників і витратомірів газу можна поділити на кілька основних типів в залежності від їхньої конструкції та принципу дії, а саме на: дзвонові, поршневі, PVTt-типу, соплові і установки на базі еталонних лічильників.

Робочий еталон об'єму газу дзвонового типу [1] складається з резервуара з рідиною, у якому розміщений дзвін, збалансований противагою, що кріпиться гнучким тросом через шків. До його

складу входять пристрій компенсації ваги дзвону, контрольна лінія з мінімальними прорізами, трубопровід для встановлення газового лічильника, регулятор витрат, датчики переміщення дзвону, температури і тиску, а також контролер для збору та обробки результатів. Пристрій компенсації ваги має форму комбінованого шківів, що включає циліндричну та конічну поверхні з багатовитковою канавкою для троса. Геометрія шківів розрахована для забезпечення рівноваги дзвона залежно від його характеристик, густини рідини та ваги противаги.

Дзвоніві установки характеризуються високою метрологічною точністю, простотою конструкції та тривалим терміном служби. Однак їхні недоліки включають великі розміри, обмежений діапазон відтворювальних витрат, обмежений контрольний об'єм, а також чутливість до мікровитоків.

Поршнева установка для лічильників та витратомірів газу [2] включає калібрований вимірювальний трубопровід із поршневим розділювачем, два детектори його положення, реверсивне джерело витрат та обліковий пристрій. Поршневий розділювач, виконаний у вигляді пористого еластичного тора з внутрішнім тиском, вищим за статичний тиск у трубопроводі, оснащений ніпельним пристроєм, вбудованим в його стінку. Установка дозволяє забезпечити високу точність і достовірність визначення метрологічних характеристик лічильників і витратомірів газу для різних робочих середовищ (наприклад, повітря, природний газ) та параметрів тиску.

Установки з поршневими еталонами функціонують за принципом вимірювання об'єму газу, витісненого поршнем у замкнутій системі, що забезпечує високу точність результатів. Вони чудово підходять для калібрування установок на невеликих витратах, але мають обмеження при роботі з великими витратами і відзначаються складністю експлуатації.

Повірочні установки PVTt-типу [3] (тиск, об'єм, температура, час), метрологічну основу яких складає ємність із засувками та приєднувальною арматурою, у внутрішній порожнині якої вмонтовані датчики температури, при цьому ємність має відводи для вимірювання надлишкового тиску в ній, а об'єм газу, який витікає із ємності через лічильник, що повіряється, визначається за рівнянням газового стану на основі об'ємів ємності і арматури, даних фізико-хімічного складу робочого середовища, часу витікання через лічильник та значень температури і тиску, отриманих на початку і в кінці вимірювань. Проте ці установки мають низьку продуктивність роботи, що пояснюється збільшенням часу вимірювання через необхідність додаткового витримування для стабілізації процесів у системі. В Україні вони застосовуються тільки при повірці побутових лічильників газу, оскільки повірка промислових лічильників газу вимагає великої матеріалоемності резервуара та вирішення проблем, що виникають при вимірюванні температур в ньому.

Принцип дії установок на критичних соплах [4] ґрунтується на створенні за допомогою джерела витрати критичного режиму витікання через відкаліброване сопло. В даному режимі витрата через дослідну ділянку залишається стабільною. Режим потоку визначається номіналом сопла критичного витікання та перепадом тиску на ньому, який не повинен перевищувати 0,7. Швидкість потоку в найбільш звуженому місці сопла встановлюється рівній швидкості звуку, що забезпечує надзвичайно високу стабільність витрати. Характерною особливістю цих установок є стабільність відтворення об'ємної витрати протягом тривалого часу.

Джерелами похибок цих установок є точність виготовлення профілю критичного сопла, точність його встановлення в трубопровід (співвісність,

наявність прямих ділянок тощо) та дотримання відповідного перепаду тиску на ньому.

Перевагою соплових установок є висока стабільність їх характеристик в часі, саме тому критичні сопла використовують в якості передавальних еталонів в багатьох країнах, а також при міжнародних звіряннях. Недоліком цих установок є те, що точність вимірювання залежить від наявності домішок в газі, які впливають на геометричні розміри сопла, а також фіксованості витрат, що можуть бути відтворені виходячи з наявних в установці номіналів сопел критичного витоку.

Принцип дії установок на базі еталонних лічильників газу ґрунтується на порівнянні результатів вимірювань лічильником газу, що досліджується, та еталонним лічильником газу, витрата для яких забезпечується за допомогою керованого джерела створення витрати. За допомогою системи керування та вимірювання, та відповідного прикладного програмного забезпечення, здійснюється автоматичне керування процесом виставлення витрати та самим вимірюванням, а також збереження та формування відповідного протоколу вимірювання.

Перевагою таких установок є можливість розширення діапазону відтворення об'єму та об'ємної витрати газу під час дослідження лічильника газу, який має значно ширший діапазон витрат та потребує пропускання великого контрольного об'єму газу для отримання достовірного результату вимірювання.

Після проведеного аналізу було прийнято рішення використати для реалізації робочого еталона установку, реалізовану на базі пристрою для калібрування та повірки лічильників і витратомірів газу [5], що складатиметься з однотипних еталонних лічильників включених паралельно. Принцип дії такої установки ґрунтується на явищі адитивності потоків, що проходять через еталонні лічильники.

Цей аналіз дав змогу оцінити недоліки і переваги існуючих установок, зробити відповідні висновки і врахувати їх при розробці робочого еталону для повірки та калібрування лічильників і витратомірів газу в діапазоні об'ємних витрат від 1 до 25 000 м<sup>3</sup>/год.

#### **Формування цілей статті**

Необхідність створення такої установки продиктована відсутнім в Україні метрологічним забезпеченням для повірки та калібрування лічильників газу типорозмірами до G16000 з внутрішнім діаметром до 500 мм. Тому розробка та проектування робочого еталону (РЕ), а саме установки в діапазоні об'ємної витрати до 25000 м<sup>3</sup>/год, яка зможе забезпечити належну простежуваність до національної еталонної бази, що має міжнародно визнані вимірювальні та калібрувальні можливості і зберігається в ДП "ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТ МЕТРОЛОГІЯ", має велику актуальність у контексті енергонезалежності нашої країни.

#### **Основний текст статті**

Робочий еталон DN50 – DN500 з максимальною витратою до 25000 м<sup>3</sup>/год розробляється з дотриманням вимог ДСТУ 3383:2007 [6] та призначений для повірки лічильників газу згідно з «Порядком проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки» [7] у відповідності до: ДСТУ 9033:2020 [8], ДСТУ 9034:2020 [9], ДСТУ 9036:2020 [10], ДСТУ 9037:2020 [11], а також може бути застосований при випробуваннях та оцінці відповідності лічильників газу на відповідність вимогам Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки [12].

Сформуємо перелік вимог до еталонної установки в діапазоні об'ємної витрати до 25000 м<sup>3</sup>/год:

- робочий еталон повинен забезпечувати простоту та надійність (герметичність) під'єднання лічильників згідно з вимогами до монтування лічильників різного типу (турбінного,

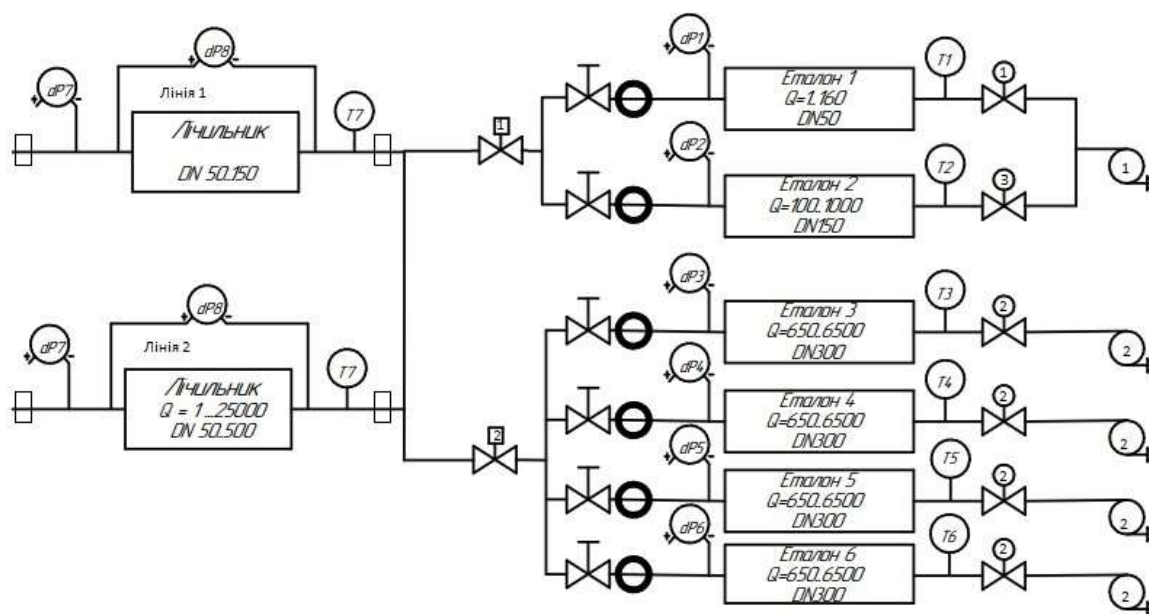


Рисунок 1 – Структурна схема робочого еталона

роторного та ультразвукового), що містяться в ЕД на ці лічильники;

- місця встановлення перетворювачів тиску й температури робочого середовища в лічильниках, що досліджують, мають відповідати вимогам, установленим в експлуатаційній документації на лічильник;

- конструктивне оформлення робочого еталона повинно відповідати сучасним вимогам ергономіки та дизайну;

Структурна схема робочого еталона наведена на рис. 1.

Умовні позначення та номенклатура елементів, зображених на структурній схемі, наведені у таблиці 1.

Проектування здійснювали керуючись наступними вимогами:

- конструкція еталона повинна забезпечувати зручне його обслуговування та доступ до всіх його елементів, а саме, еталонних лічильників, перетворювачів тиску та температури, засувок тощо;

- дослідні лінії 1-2 та еталонні лічильники 2-6 повинні бути розміщені на висоті 950 мм над рівнем підлоги (Еталон 1 повинен бути розміщений на одній висоті з Еталоном 2 або над ним);

- дослідні та еталонні лінії повинні забезпечувати приєднання перетворювачів температури на відстані 2DN до

еталона/лічильника та 2DN після еталона/лічильника.

- Дослідні та еталонні лінії повинні мати фітинги для відбору тиску/розрідження на відстані 2DN до еталона/лічильника та 2DN після еталона/лічильника;

- дослідні лінії повинні бути оснащені допоміжними елементами для монтажу/демонтажу за допомогою кран-балки або тельфера;

- під дослідними лініями повинні бути розроблені переносні регулюючі опори для утримання відповідних прямих ділянок DN50, DN80, DN100, DN150, DN200, DN250, DN300, DN400, DN500;







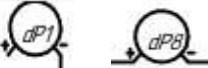





- всі виготовлені елементи робочого еталона повинні бути покриті захисним покриттям (фарба/гальванічне покриття);

- вхідні ділянки трубопроводів перед Еталонними лічильниками 1 – 6, а також перед досліджуваним лічильником не повинні бути меншими ніж 10DN;

- вихідні ділянки трубопроводів після Еталонних лічильників 1 – 6, а також після досліджуваного лічильника не повинні бути меншими ніж 5DN;

- відстань перед вхідною ділянкою лічильника і будь-якою перешкодою не повинна бути меншою за 3.5 м.

Таблиця 1 - Умовні позначення та номенклатура необхідних елементів,  
 які будуть застосовані в складі установки

Позначення	Номенклатура
	Вентилятор – 1 шт.
	Вентилятори з електродвигуном 45 кВт. 3000 об/хв. - 4 шт.
	Поворотний затвор DN50 PN16 виробництва – 1 шт.
	Поворотний затвор DN300 PN16 виробництва – 4 шт.
	Поворотний затвор DN150 PN16 виробництва – 1 шт.
	Перетворювачі температури з зовнішньою різьбою M20x1.5 – 7 шт.
	Перетворювачі перепаду тиску – 8 шт.
	Вібровставка, EPDM, Ру16 (Діаметр у відповідності до місця монтажу) – 6 шт.
	Кран фланц. Ду 50/50 цільнозварний (Ру=16, Т=-35...+180°C) – 1шт. Кран кульовий фланцевий 565 Ду 150 Ру=16 – 1 шт. Кран фланц. Ду 300/300 цільнозварний з редуктором (Ру=16, Т=-30...+180°C) – 1шт. <i>(Місце встановлення відповідно до діаметру трубопроводу)</i>
	Затвор дисковий поворотний міжфланцевий, батерфляй DN150 PN16 – 1 шт.
	Затвор дисковий поворотний міжфланцевий, батерфляй DN500 PN16 – 1шт.
	Фланцеві під'єднання : Лінія 1 – від DN50 до DN150 Лінії 2 – від DN50 до DN500
Еталон 1	Еталон роторного типу G100 – 1 шт.
Еталон 2	Еталон роторного типу G650 – 1шт.
Еталон 3 – Еталон 6	Еталон турбінного типу G4000 DN300 – 4шт.
Лінія 1	Дослідна лінія для монтажу лічильників газу роторного, турбінного, ультразвукового типів умовного діаметру від 50 мм до 150 мм з універсальним фланцевим під'єднанням до фланців лічильника розрахованого на тиск від PN6 до PN100
Лінія 2	Дослідна лінія для монтажу лічильників газу роторного, турбінного, ультразвукового типу умовного діаметру від 50 мм до 500 мм з універсальним фланцевим під'єднанням до фланців лічильника розрахованого від PN6 до PN100

Принцип установки побудований на порівнянні приведеного до стандартних умов об'єму газу, який облікував еталонний лічильник із об'ємом, вимірним дослідним лічильником, який повіряється. В якості еталонних лічильників в установці застосований набір з чотирьох турбінних та двох роторних лічильників.

Робочий еталон, який спроектований фахівцями ДП "ІВАНО-ФРАНКІВСЬК-СТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ" [13] з максимальною витратою до 25000 м<sup>3</sup>/год, складається з системи трубопроводів з агрегатами для створення потоку газу, набору паралельно встановлених еталонних лічильників газу (ЕЛ) і досліджуваного лічильника газу, встановленого послідовно до еталонних лічильників, системи регулювання витрати, перетворювачів температури і тиску, системи збору, передачі і обробки інформації. В складі установки паралельно встановлені еталонні лічильники DN 300 з можливістю одночасної роботи. При цьому набір з шести ЕЛ механічно розв'язаний від агрегатів створення потоку газу і досліджуваного лічильника газу через спеціалізовані вібровставки, чотири паралельних еталонних ліній з ЕЛ з витратою 6500 м<sup>3</sup>/год пропорційні зростанню значення досліджуваної витрати. Система регулювання витрати газу через досліджуваний лічильник газу виконана багатоступенева і включає агрегати для створення потоку з частотним управлінням, для чотирьох ліній, регулятор витрати з позиційним регулюванням стабілізації потоку при різних режимах роботи агрегату і засувки з обертовими приводами і позиційним регулюванням для забезпечення точного виставлення витрати в кожній еталонній лінії. 3D-модель робочого еталону одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні об'ємної витрати від 1 м<sup>3</sup>/год до 25000 м<sup>3</sup>/год наведена на рис.2.

Паралельне використання таких еталонних лічильників газу у стенді

дозволяє збільшити діапазон відтворюваних витрат, що залежить від кількості встановлених і задіяних еталонних лічильників газу, забезпечити метрологічну простежуваність вимірювань до національної еталонної бази, а саме до вторинних еталонів в діапазоні об'ємної витрати газу до 7800 м<sup>3</sup>/год, що володіють міжнародно визнаними вимірювальними можливостями та опублікованими СМС-рядками в міжнародній базі KCDB під грифом UA4.

Лічильники пройшли калібрування на державному вторинному еталоні одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ВЕТУ 03-01-03-11 та ВЕТУ 03-01-04-12 таким чином їхні динамічні діапазони будуть перетинатися за декількох значень об'ємних витрат. Це дає суттєві переваги, в порівнянні із типовими повірочними установками з еталонними лічильниками, в яких діапазони еталонних лічильників перетинаються тільки в одній спільній точці.

Тобто із застосуванням програмного забезпечення установки є можливість проведення діагностичних вимірювань з метою постійного контролю стабільності метрологічних характеристик та невизначеності вимірювань установки.

У відповідності до Порядку калібрування вторинних та робочих еталонів [14], установки, які застосовуються для проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки – лічильників газу, повинні пройти обов'язкову процедуру калібрування із розрахунком значення розширеної невизначеності.

Розрахунок розширеної невизначеності вимірювань еталонної установки здійснюється під час проведення її калібрування. Процедура калібрування проводиться згідно методики [15]. Методика на початковому етапі передбачає поетапне калібрування каналів вимірювання тиску та температури (на лініях еталонних лічильників та на дослідній лінії) і часу. Калібрування

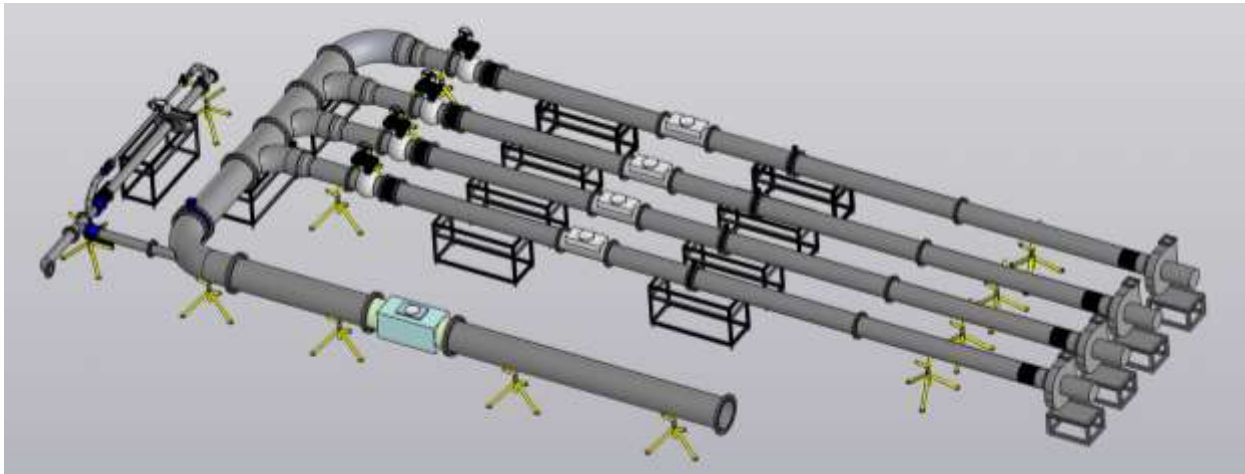


Рисунок 2 – 3D-модель робочого еталону одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні об'ємної витрати від 1 м<sup>3</sup>/год до 25000 м<sup>3</sup>/год

вказаних каналів проводиться в складі установки для виключення впливу монтажу, забезпечення герметичності та перевірки роботи програмного забезпечення. Для калібрування застосовують калібратор тиску, термостат з еталонним термометром та частотомір. Для кожного каналу визначається складова сумарної невизначеності за типом *A* та типом *B* (з врахуванням невизначеності еталонного засобу, яким проводили калібрування).

Калібрування каналу вимірювання об'єму газу, тобто еталонного лічильника, відбувається із застосуванням еталонів передавання. Еталони передавання проходять періодичне калібрування на національних державних первинних та вторинних еталонах об'єму та витрати газу.

Крім того, проводиться розрахунок складової невизначеності, яка зумовлена ефектом накопичення об'єму через зміну температури за час проведення калібрування. Для зменшення впливу цього ефекту, установка сконструйована із застосуванням чотирьох паралельних ліній (Ду 300 мм) для монтажу лічильників, з можливістю відсікання додаткового приєднаного об'єму. При цьому, розрахунки проводяться для кожного еталонного лічильника в складі установки.

Розрахунок цієї складової невизначеності здійснюється за наступною формулою:

$$\Delta_{V_{EH}^i} = V_T \cdot \left( \left| \frac{T_{enMM} - T_{stMM}}{T_{stMM} + 273,15} \right| + \left| \frac{T_{enTM} - T_{stTM}}{T_{stTM} + 273,15} \right| \right), \quad (1)$$

$V_T$  – сумарний об'єм внутрішнього простору установки між еталоном передавання та еталонним лічильником, м<sup>3</sup>,  $T_{enMM}$ ,  $T_{stMM}$ ,  $T_{enTM}$ ,  $T_{stTM}$  – температури в кінці (*en*) та на початку (*st*) вимірювання перетворювачів на еталонному лічильнику (ММ) та на еталоні передавання (ТМ) відповідно, °С.

Невизначеність вимірювання, зумовлена ефектом накопичення об'єму:

$$u_{BV_{EH}^i} = 100 \cdot \frac{\Delta_{V_{EH}^i}}{\sqrt{3} \cdot V_K}, \quad (2)$$

$V_K$  – контрольний об'єм, який проходить через еталонний лічильник за час одного вимірювання, м<sup>3</sup>.

Наступним етапом проводиться калібрування еталонних лічильників. Калібрування еталонних лічильників рекомендується проводити в порядку спадання максимальної витрати. Калібрування кожного еталонного лічильника проводиться не менше ніж в 9-ти точках об'ємної витрати, розподілених у всьому діапазоні об'ємної витрати у

порядку спадання. Допускається дослідження у додаткових точках витрат якщо форма характеристики еталонного лічильника вимагає детальніших досліджень частини діапазону. Калібрування еталонного лічильника установки полягає у визначенні коефіцієнта перетворення ( $K$ ), що відповідає  $1 \text{ м}^3$ . Його розрахунок здійснюється за наступною формулою:

$$K_i = \frac{N_i}{V_i}, \quad (3)$$

$N_i$  – кількість імпульсів еталонного лічильника, що відповідає об'єму  $V_i$ .

Слід врахувати, що при підрахунку імпульсів виникає невизначеність, яка пов'язана із неврахуванням імпульсів за  $i$ -ого значення об'ємної витрати, яка визначається як:

$$u_{BN_i} = 100 \cdot \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \frac{2}{N_i}, \quad (4)$$

$N_i$  – кількість імпульсів з еталонного лічильника за  $i$ -того значення об'ємної витрати.

За результатами всіх вимірювань, використовуючи метод найменших квадратів, визначають коефіцієнти апроксимаційного полінома для кожного еталонного лічильника наступного виду:

$$K(q) = A_{-2}q^{-2} + A_{-1}q^{-1} + A_0 + A_1q + A_2q^2, \quad (5)$$

$A_i$  – коефіцієнти апроксимаційного полінома, які визначаються за результатами калібрування;  $q$  – об'ємна витрата,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Для визначення складової невизначеності за типом  $B$  для кожного еталонного лічильника, проводять не менше, ніж 3 вимірювання за допомогою еталона передавання та обчислюють невизначеність за формулою:

$$u_{B_{MM_i}} = \frac{(\overline{\delta_{PR_j}} - \delta_{TM_j})}{\sqrt{3}}. \quad (6)$$

$\overline{\delta_{PR_j}}$  – середнє значення похибки, отриманої для еталона передавання на

установці за  $i$ -ого значення об'ємної витрати, %;

$\delta_{TM_j}$  – значення похибки еталона передавання, отримане під час його калібрування на національному первинному або вторинному еталонах за  $i$ -ого значення об'ємної витрати, %

Після чого здійснюють розрахунок невизначеності вимірювання за типом  $A$  під час проведення калібрування еталонної установки з врахуванням наступних складових:

$$u_{A_i} = \sqrt{u_{AMM_i}^2 + u_{AP}^2 + u_{AT}^2}. \quad (7)$$

$u_{AMM_i}$  – невизначеність за типом  $A$  еталонного лічильника (ММ);

$u_{AP}$  – невизначеність за типом  $A$  вимірювання тиску;

$u_{AT}$  – невизначеність за типом  $A$  вимірювання температури.

Відповідно невизначеність за типом  $B$  еталонної установки буде аналогічно визначатись з урахуванням наступних складових:

$$u_{B_i} = \sqrt{u_{TM}^2 + u_{B_{MM_i}}^2 + u_{BP}^2 + u_{BT}^2 + u_{BN_i}^2 + u_{B_{V_{EH^i}}}^2}. \quad (8)$$

$u_{TM}$  – невизначеність еталона передавання;

$u_{B_{MM_i}}$  – невизначеність за типом  $B$  еталонного лічильника;

$u_{BP}$  – невизначеність за типом  $B$  вимірювання тиску;

$u_{BT}$  – невизначеність за типом  $B$  вимірювання температури;

$u_{BN_i}$  – невизначеність неврахування імпульсів;  $u_{B_{V_{EH^i}}}$  – невизначеність впливу ефекту накопичення.

Розширена стандартна невизначеність вимірювання об'єму  $U_i$  розраховується індивідуально для кожного  $i$ -того еталонного лічильника з врахуванням складових за типом  $A$  (7) та складових за типом  $B$  (8), за наступною формулою:

$$U_i = 2 \cdot \sqrt{u_{A_i}^2 + u_{B_i}^2}, \quad (9)$$



Рисунок 3 – Робочий еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні об'ємної витрати від 1 до 25000 м<sup>3</sup>/год

За результатами розрахунків вибирається найбільше значення розширеної невизначеності вимірювання.

Програмне забезпечення еталонної установки містить обов'язкові вимоги до нових методик повірки на лічильники газу турбінного, роторного, ультразвукового типів та лічильники із вбудованими пристроями перетворення, які містяться в національних стандартах [8 – 11]. Зокрема, передбачено формування електронного протоколу повірки із збереження необхідних первинних даних. Також передбачений розрахунок контрольної суми параметрів налаштування програми, яка чинить вплив на метрологічні характеристики, зокрема: коефіцієнти перетворення еталонних лічильників та параметри калібрування вимірювальних перетворювачів, що входять до складу еталона. Відповідно до пунктів методик повірки повинно виконуватись два вимірювання за кожного значення об'ємної

витрати газу. Слід відзначити, що для оцінки придатності з двох значень отриманої основної відносної похибки лічильника, обирають більше за модулем, а не середнє арифметичне значення з двох послідовних вимірювань.

Загальний вигляд робочого еталону одиниць об'єму та об'ємної витрати газу в діапазоні об'ємної витрати газу від 1 до 25000 м<sup>3</sup>/год наведено на рис. 3.

В установці, в залежності від параметрів лічильника, який повіряється, реалізовано наступний метод повірки: «старт з ходу», тобто установка забезпечує початок і закінчення відліку контрольного об'єму за сигналом (імпульсом) від лічильника газу.

Крім того, в переліку операцій повірки, яка здійснюється після ремонту лічильника газу введено вимоги обов'язкового визначення середньозваженої похибки (WME), яка визначається за наступною формулою:

$$WME = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n k_i}. \quad (10)$$

$\delta$  – основна відносна похибка лічильника, що повіряється (у відсотках);  
 $q_i$  – значення об'ємної витрати газу, на якому проводиться повірка;

$$k_i = \frac{q_i}{q_{\max}} \text{ при } q_i \leq 0,7 q_{\max};$$

$$k_i = 1,4 - \frac{q_i}{q_{\max}} \text{ при } 0,7 q_{\max} < q_i \leq q_{\max}.$$

Для розробленої установки передбачене перспективне застосування для проведення серії різноманітних випробувань лічильників газу в рамках проведення оцінки відповідності вимогам Технічного регламенту засобів вимірювальної техніки. Зокрема, згідно нормативних документів [16, 17], які є доказовою базою, зазначено перелік випробувань на збурення потоку. Конструкцією установки передбачена технічна можливість встановлення завод на збурення потоку низького рівня і збурення потоку високого рівня, в тому числі, встановлення різного типу місцевих опорів та трубопроводів з поворотом на  $90^\circ$  в одній та двох площинах одночасно.

#### Висновки

В Україні до недавнього часу була відсутня метрологічна база для повірки, калібрування та дослідження лічильників газу великих діаметрів DN400-DN500. Це створювало значну технічну прогалину у забезпеченні надійності та достовірності вимірювань та відповідності сучасним стандартам.

Відповідно до наведених вимог розроблено структурну схему робочого еталону у діапазоні об'ємної витрати від 1 до 25 000 м<sup>3</sup>/год. Описано конструктивні особливості установки та її принцип дії при виконанні робіт з повірки та калібрування та дослідження лічильників газу.

Здійснено оцінку невизначеності вимірювань, яка показала відповідність робочого еталону вимогам метрологічної простежуваності, що дало можливість підвищити ефективність процесу калібрування та знизити експлуатаційні витрати. Отримані дані підтвердили можливість використання системи робочого еталону для повірки лічильників (до DN500), що раніше не було реалізовано в Україні.

Запропонована методологія має перспективи для подальшої адаптації та інтеграції у міжнародні метрологічні системи. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення міжнародно визнаних вимірювальних та калібрувальних можливостей ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ».

#### Список використаних джерел

1. Робочий еталон об'єму газу дзвонового типу: пат 76283 Україна № 20040705918; заявл. 19.07.2004; опубл. 17.07.2006. Бюл. № 7 . 6 с.
2. Калібрувальна поршнева установка одиниць об'єму та об'ємної витрати газу на реальному середовищі при високих тисках: пат 85973 Україна № u201306810; заявл. 31.05.2013; опубл. 10.12.2013. Бюл. № 23. 3 с.
3. Автоматизована установка повірки промислових лічильників газу: пат 59795 Україна № u201015246; заявл. 17.12.2010; опубл. 25.05.2011. Бюл. № 10 . 16 с.
4. ISO 9300:2022 Measurement of gas flow by means of critical flow nozzles.
5. Пристрій для калібрування, метрологічної атестації та повірки лічильників і витратомірів газу: пат 63180 Україна № u201105256; заявл. 26.04.2011; опубл. 26.09.2011. Бюл. № 18. 8 с.
6. ДСТУ 3383:2015 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу.

7. Порядок проведення повірки законодавчо регульованих засобів виміральної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів, затверджений Наказом Мінекономрозвитку від 08.02.2016 р. № 193.

8. ДСТУ 9033:2020 Метрологія. Лічильники газу турбінні. Методика повірки ДСТУ.

9. ДСТУ 9034:2020 Метрологія. ЛІЧІЛЬНИКИ ГАЗУ РОТОРНІ. Методика повірки.

10. ДСТУ 9036:2020 Метрологія. Лічильники газу ультразвукові. Методика повірки ДСТУ.

11. ДСТУ 9037:2020 Метрологія. Лічильники газу з вбудованими пристроями перетворення об'єму. Методика повірки.

12. Технічний регламент засобів виміральної техніки, затверджений Постановою КМУ від 24.02.2016 р. № 163.

13. Катамай В., Коржак О., Малісевич В., Середюк Д., Бас О., Лемішка В. Оцінка розширеної невизначеності робочого еталону в діапазоні об'ємної витрати до 25000 м<sup>3</sup>/год тези: II міжнародна науково-практична конференція (м. Львів, 13-14 листопада 2024). м. Львів. 2024. С. 26-27.

14. Україна. Накази. Про затвердження Порядку калібрування вторинних та робочих еталонів [Текст]: Наказ [прийнятий Мінекономрозвитку України 10.08.2020 р. № 1518. Київ: Офіційний вісник України [2020 р.]. № 84, с. 180, стаття 2728.

15. МК 004 РД/03-2023 Метрологія. Установки з еталонними лічильниками. Методика калібрування.

16. ДСТУ OIML R 137-1-2:2018 Лічильники газу. Частина 1. Метрологічні й технічні вимоги. Частина 2. Методи підтвердження метрологічних і технічних характеристик (OIML R 137-1-2:2014, IDT)

17. ДСТУ EN 12261:2019 Лічильники газу. Турбінні лічильники газу (EN 12261:2018, IDT).

## References

1. Working gas volume standard of bell-type: patent 76283 Ukraine No. 20040705918; filed 19.07.2004; published 17.07.2006 Bulletin No. 7, 6 p. [in Ukrainian]

2. Calibration piston unit for volume and volumetric gas flow measurement under real conditions at high pressures: patent 85973 Ukraine No. u201306810; filed 31.05.2013; published 10.12.2013 Bulletin No. 23, 3 p. [in Ukrainian]

3. Automated verification unit for industrial gas meters: patent 59795 Ukraine No. u201015246; filed 17.12.2010; published 25.05.2011 Bulletin No. 10, 16 p. [in Ukrainian]

4. ISO 9300:2022 Measurement of gas flow by means of critical flow nozzles.

5. Device for calibration, metrological certification, and verification of gas meters and flow meters: patent 63180 Ukraine No. u201105256; filed 26.04.2011; published 26.09.2011 Bulletin No. 18, 8 p. [in Ukrainian]

6. DSTU 3383:2015 Metrology. National verification scheme for instruments measuring gas volume and volumetric flow. [in Ukrainian]

7. Order of the Ministry of Economic Development dated 08.02.2016 No. 193 "On the approval of the Procedure for the verification of legally regulated measuring instruments in operation and the documentation of its results," registered with the Ministry of Justice on 24.02.2016 No. 278/28408. [in Ukrainian]

8. DSTU 9033:2020 Metrology. Turbine gas meters. Verification methodology. [in Ukrainian]

9. DSTU 9034:2020 Metrology. Rotary gas meters. Verification methodology. [in Ukrainian]

10. DSTU 9036:2020 Metrology. Ultrasonic gas meters. Verification methodology. [in Ukrainian]

11. DSTU 9037:2020 Metrology. Gas meters with built-in volume conversion devices. Verification method. [in Ukrainian]

12. Technical regulations for measuring instruments, approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 24.02.2016 No. 163. [in Ukrainian]

13. Katamay V., Korzhak O., Malisevich V., Seredyuk D., Bas O., Lemishka V. Estimation of the expanded uncertainty of the working standard in the range of volumetric flow up to 25000 m<sup>3</sup>/h Abstracts: II International Scientific and Practical Conference Lviv November 13-14, 2024. Lviv. 2024 P. 26-27. [in Ukrainian]

14. Ukraine. Orders. On approval of the Procedure for calibration of secondary and working standards [Text]: Order [adopted by the Ministry of Economic Development of Ukraine on 10.08.2020 No. 1518. Kyiv: Official Gazette of Ukraine [2020]. No. 84, p. 180, article 2728. [in Ukrainian]

15. MK 004 RD/03-2023 Metrology. Installations with reference meters. Calibration methodology. [in Ukrainian]

16. DSTU OIML R 137-1-2:2018 Gas meters. Part 1. Metrological and technical requirements. Part 2. Methods of confirmation of metrological and technical characteristics (OIML R 137-1-2:2014, IDT). [in Ukrainian]

17. DSTU EN 12261:2019 Gas meters. Turbine gas meters (EN 12261:2018, IDT). [in Ukrainian]

**CONDUCTING METROLOGICAL  
RESEARCH OF GAS METERS IN THE  
RANGE OF GAS VOLUME FLOW  
UP TO 25,000 M<sup>3</sup>/HOUR WITHIN THE  
FRAMEWORK OF UKRAINE'S ENERGY  
SECURITY**

V. V. Malisevich, D. O. Seredyuk,  
Y. T. Pelikan, V. B. Katamay

State Enterprise "Ivano-Frankivsk Scientific and  
Production Center of Standardization, Metrology and  
Certification";

127 Vovchynetska St., Ivano-Frankivsk, 76006,  
Ukraine;

e-mail: [ifstandartmetrology@gmail.com](mailto:ifstandartmetrology@gmail.com)

## МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 620.179.1

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-46-52

### ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ МІНІМАЛЬНОГО РАДІУСА МІСЦЯ ЗГИНАННЯ ПРИ ПРОФІЛЮВАННІ

*О. Ю. Сєверін, Ю. О. Плєснецов, С. Ю. Плєснецов**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;  
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: Yurii.Pliesnetsov@khpі.edu.ua*

Зростаюча потреба в якісних профілях зі сталей різних марок поставила перед виробниками гнутих профілів завдання щодо коригування оцінок міцності та пластичних властивостей вихідних матеріалів. Питання про руйнування матеріалів у процесі профілювання (насамперед про мінімальні допустимі радіуси згинання) раніше вирішувалося на базі їх відносного подовження  $\delta_{10}$ . Однак надалі було доведено, що коректнішим показником пластичності матеріалу для профілювання слід вважати відносне поперечне звуження  $\psi_{\text{ш}}$ . Виходячи з оцінки пластичності, були розроблені методи визначення мінімально допустимих радіусів згинання. Однак, оскільки  $\psi_{\text{ш}}$  при одновісному розтягуванні не дорівнює  $\psi_{\text{ш}}$  при двовісному розтягуванні, яке має місце на зовнішній поверхні місця згинання, необхідно вводити коригувальні коефіцієнти. Необхідність урахування впливу схеми напружено-деформованого стану призвела до появи уточнених коефіцієнтів, точне визначення яких найчастіше є неможливим. З порівняння питомої роботи деформування при згинанні з критичною роботою руйнування в роботі отримано критичний радіус руйнування  $r_k$ , який, при згинанні сталі СтЗсп, дорівнює 0,16. Для сталі 09Г2 критичний радіус руйнування дорівнює 0,27. У роботі встановлено, що зі збільшенням кута підгинання, величина критичного радіусу також збільшується. Технологічні радіуси згинання мають відрізнятися від розрахункових значень критичного радіусу згинання коефіцієнтом запасу міцності. Для поштучного процесу профілювання, коли мають місце наклеп і задири на кінцях смуги, відносний мінімальний внутрішній радіус місця згинання слід визначати за формулою  $r_{\text{min}}=(2,8\dots3,5)r_k$ . У роботі методом механіки суцільних середовищ із використанням поля швидкостей переміщень визначено питому роботу деформування елементарного обсягу місця згинання при профілюванні. З порівняння питомої роботи деформування при згинанні з критичною роботою руйнування отримано критичний радіус руйнування. В роботі встановлено, що технологічні радіуси місць згинання повинні відрізнятися від розрахункових значень критичного радіусу згинання коефіцієнтом запасу міцності.

**Ключові слова:** неруйнівний контроль, вимірювання, властивості матеріалів, профілювання, місце згинання, міцність, пластичність, коефіцієнт запасу.

The increased demand for high-quality sections made of various grades of steel has set the problem of adjusting the estimates of the strength and plastic properties of the original materials for manufacturers of bent sections. The issue of material destruction during profiling (primarily the minimum permissible bending radii) was previously resolved based on their relative elongation  $\delta_{10}$ . However, it was later proven that a more correct indicator of material plasticity for profiling should be considered the relative transverse contraction  $\psi_{\text{ш}}$ . Based on the assessment of plasticity by  $\psi_{\text{ш}}$ , methods for determining the minimum permissible bending radii were developed. However, since  $\psi_{\text{ш}}$  under uniaxial tension is not equal to  $\psi_{\text{ш}}$  under biaxial tension, which occurs on the outer surface of the bending point, it is necessary to introduce correction factors. The need to take into account the influence of the stress-strain state scheme led to the emergence of refined factors, the exact determination of which is often impossible. The critical radius of destruction  $r_k$  was obtained from a comparison of the specific deformation work during bending with the critical destruction work, which is 0.16 for bending for steel St. 3sp and 0.27 for steel 09G2. The paper found that the critical radius also increases with an increase in the bending angle. Technological bending radii should differ from the calculated values of the critical bending radius by a safety factor. For piece profiling, when there is work hardening and burrs at the ends of the strip, the relative minimum internal bending radius should be determined by the formula  $r_{\text{min}}=(2,8\dots3,5)r_k$ . In the paper, the specific deformation work of an elementary volume of a bending point during profiling was determined using the method of continuum mechanics and the field of displacement velocities. The critical destruction radius was obtained from a comparison of the specific

deformation work during bending with the critical destruction work. The work established that the technological radii of bending points should differ from the calculated values of the critical bending radius by a safety factor.

**Keywords:** nondestructive testing, measurement, material properties, profiling, bending point, strength, plasticity, margin ratio.

### Вступ

Зростаюча потреба в якісних профілях зі сталей різних марок поставила дослідників перед необхідністю правильної оцінки міцності та пластичних властивостей матеріалу. Питання руйнування матеріалу у процесі профілювання, насамперед щодо мінімальних допустимих радіусів згинання, вирішували, базуючись на показниках відносного подовження матеріалів  $\delta_{10}$ . Однак надалі було доведено, що правильним є вважати показником пластичності матеріалу відносно поперечне звуження  $\psi_{ш}$ . Виходячи з оцінки пластичності були розроблені методи визначення мінімально допустимих радіусів згинання. Але, оскільки  $\psi_{ш}$  при одновісному розтягуванні не дорівнює  $\psi_{ш}$  при двовісному розтягуванні, яке має місце на зовнішній поверхні місця згинання, необхідно ввести коригувальні коефіцієнти. Необхідність урахування впливу схеми напружено-деформованого стану також призвела до появи додаткових коефіцієнтів, точне визначення яких найчастіше неможливе.

### Постановка дослідження

У роботах [1-6] показано, що критерієм руйнування матеріалів може бути лише величина, яка враховує накопичення енергії у різних точках тіла. Такою величиною є питома робота деформування одиничного об'єму розривного зразка до руйнування. З умови пластичності Губера-Мізеса цей критерій можна поширити різні схеми напружено-деформованого стану. Для визначення максимальних величин питомої роботи деформування елементарного об'єму заготовки при профілюванні необхідно знати величини інтенсивності швидкостей деформацій  $\varepsilon_i$ , деформацій  $e_i$ , а також інтенсивності напружень  $\sigma_i$ .

Поле швидкостей переміщень часток при профілюванні можна описати наступними рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} v_r &= -\frac{\omega}{2\varphi_0} \left( r + \frac{\rho^2}{r} \right) - \\ &\quad - \frac{R_H (r^2 - R_B^2) \Delta s_{\max}}{2\rho r s_0} \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \\ v_r &= \omega \frac{\varphi}{\varphi_0} r + \frac{R_H r \Delta s_{\max}}{\rho s_0} \cdot \\ &\quad \cdot \left( \frac{3}{8} \varphi + \frac{\varphi_0}{2\pi} \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi_0} + \frac{\varphi_0}{16\pi} \sin \frac{2\pi\varphi}{\varphi_0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Вираз для інтенсивності швидкостей деформації має такий вигляд:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho^2}{r^2} \right) + \frac{\Delta s_{\max} R_3}{\rho s_0} \cdot \left( 1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[ \frac{4R_3\varphi_0\Delta s_{\max} (r^2 - R_B^2)}{\rho s_0 \pi r^2} \cdot \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2}, \quad (2)$$

де  $v_\varphi$  и  $v_r$  – проєкції тангенціальної та радіальної складових швидкостей переміщення частинок на відповідні осі;  $\omega$  – кутова швидкість повороту торця заготовок;

$\varphi, \varphi_0$  – поточна та кінцева величина кутів згинання;

$R_3, R_B$  – зовнішній та внутрішній радіус згинання, відповідно;

$r$  – поточна величина радіусу;

$\rho$  – радіус нейтрального шару напруг, визначається за залежністю:

$$\rho = \sqrt{R_3 R_B};$$

$s_0$  – товщина заготовки, що підгинається;

$\Delta s_{\max}$  – максимальна величина абсолютного зменшення товщини місця згинання заготовки (стоншення);

$\varepsilon_i$  – інтенсивність швидкостей деформації.

Якщо ввести відносні величини, формула (2) набуде вигляду:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left( 1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[ \frac{4r_H\varphi_0\eta(\bar{r}^2 - r_B^2)}{\pi\rho_1\bar{r}^2} \cdot \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2}, \quad (3)$$

де  $r_3, r_B$  и  $r$  – відносні величини зовнішнього, внутрішнього та поточного радіусів відповідно;

$\eta$  – відносне стоншення, що визначається залежністю:

$$\eta = \frac{\Delta s_{\max}}{s_0}.$$

Функція дисипації енергії  $E$  визначається виразом:

$$E = \varepsilon_i \sigma_i. \quad (4)$$

Підставляючи в рівняння (4) значення  $\varepsilon_i$  з (3), отримуємо:

$$E = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_i \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left( 1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \cos^4 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2 + \left[ \frac{4r_H\varphi_0\eta(\bar{r}^2 - r_B^2)}{\pi\rho_1\bar{r}^2} \cdot \cos^3 \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \sin \frac{\pi\varphi}{2\varphi_0} \right]^2}. \quad (5)$$

З аналізу виразу (5) випливає, що дисипація енергії досягає максимуму на зовнішній та внутрішній поверхнях місця згинання при  $\varphi=0$ .

Підставляючи значення  $\varphi=0$  в (5), отримуємо:

$$E = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \sqrt{\left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{\rho_1^2}{\bar{r}^2} \right) + \frac{\eta r_H}{\rho_1} \left( 1 + \frac{r_B^2}{\bar{r}^2} \right) \right]^2}. \quad (6)$$

Згідно з (9) при згинанні до відносного внутрішнього радіусу  $r_B > 0,05$  руйнуванню раніше будуть піддаватися волокна зовнішньої поверхні місця згинання.

Підставляючи в (6) значення  $\bar{r} = r_H$  та відносний радіус нейтрального шару напружень  $\rho_1 = \sqrt{r_H r_B}$ , отримаємо вираз для дисипації енергії в найбільш небезпечній точці зовнішньої поверхні:

$$E = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{r_B}{r_H} \right) + \frac{\eta \sqrt{r_H}}{\sqrt{r_B}} \left( 1 + \frac{r_B^2}{r_H^2} \right) \right]. \quad (7)$$

### Визначення роботи деформування

Максимальну питому роботу деформування елементарного об'єму зовнішньої поверхні місця згинання можна отримати, проінтегрувавши вираз (7) за часом:

$$A_{\text{вд}} = \int_0^+ \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \left[ \frac{\omega}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{r_B^2}{r_H^2} \right) + \frac{\eta \sqrt{r_H}}{\sqrt{r_B}} \left( 1 + \frac{r_B^2}{r_H^2} \right) \right]. \quad (8)$$

У цьому виразі  $\sigma_i, r_B, r_H$  и  $\eta$  взаємопов'язані, а також залежать від часу  $t$ . Встановити цей зв'язок у простому виді та проінтегрувати вираз (8) у загальному виді неможливо. Тому для визначення величини питомої роботи деформування було застосовано метод наближеного обчислення.

При визначенні деформацій на зовнішній та внутрішній поверхнях місця вигину весь процес вигину до відносного внутрішнього радіусу  $r_B$  був поділений на  $n$  інтервалів та визначено середнє значення інтенсивності швидкостей деформацій  $\varepsilon_{i\text{ср}}$ , які діють в даному інтервалі, та збільшення деформацій за інтервал.

З урахуванням (8), апроксимацію кривих  $\sigma_i - \varepsilon_i$  виконуємо ступеневою функцією.

При цьому:

1) на ділянці, де  $e \leq 0,4$ :

$$\sigma_i = B_1 e_i^m, \quad (9)$$

2) на ділянці, де  $e \geq 0,4$ :

$$\sigma_i = K + B_2 e_i^{m_1}. \quad (10)$$

У виразах (9) і (10)  $B_1, B_2, m_1$  та  $K$  – константи матеріалу.

Таким чином, середня величина дисипації енергії у кожному інтервалі визначатиметься, як:

$$E_{сер} = \varepsilon_{іср} \cdot \sigma_i. \quad (11)$$

Приріст роботи деформування за інтервал отримаємо, помноживши дисипацію енергії на час деформування:

$$\Delta A = E_{сер} \Delta t. \quad (12)$$

Сумарну роботу, що витрачається на деформування елементарного об'єму при згинанні смуги у валках профілезгинальних станів до відносного внутрішнього радіусу згинання  $r_B$ , отримаємо, підсумувавши приріст роботи в окремих інтервалах:

$$A_{сум} = \sum \Delta A. \quad (13)$$

Приклад визначення величини питомої роботи деформування елементарного об'єму при згинанні смуги з кутом  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  та відносним внутрішнім радіусом згинання  $r_B=1$  для сталі СтЗсп наведено у табл. 1.

Як і при визначенні деформацій, фіксувалися проміжні положення валків при  $r_B$ , що дорівнює 250, 100, 50 та ін. з відповідними кутами згинання. Оскільки швидкості переміщення часток при профілюванні відносно малі, можна прийняти  $\omega=1$ . Тоді із співвідношення

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (14)$$

отримаємо:

$$\Delta\varphi = \Delta t. \quad (15)$$

За рівнянням (12) визначаємо збільшення роботи між двома суміжними положеннями валків. За рівнянням (13) визначено сумарну роботу, що витрачається на деформування елементарного обсягу при згині з кінцевим відносним внутрішнім радіусом  $r_B$  та кутом згинання.

Подібним чином було обчислено максимальну величину питомої роботи деформування елементарного об'єму при згинанні смуги з кутом  $\pi/4$  та різними відносними внутрішніми радіусами згинання.

**Таблиця 1 – Приклад послідовності розрахунку питомої роботи деформування елементарного об'єму при згинанні смуги з кутом  $\varphi_0=\pi/4$  та відносним внутрішнім радіусом згинання  $r_B=1$  для сталі СтЗсп**

Величина, що визначається	при $r_B$							
	250	100	50	25	10	5	2	1
$\varepsilon_i, 1/\text{сек}$	0,536	0,536	0,523	0,505	0,458	0,472	0,5	0,49
$e_n$	0,002	0,005	0,0099	0,0194	0,0464	0,0826	0,1758	0,3308
$\sigma_i, \text{Мн}/\text{м}^2$	188	211	273	288	388	443	530	610
$E, \text{Мн}/\text{м}^2 \text{ сек}$	0,101	0,113	0,143	0,145	0,178	0,209	0,265	0,299
$\Delta t, \text{сек}$	1/233,2	1/233,2	1/93,6	1/46,8	1/23,4	0,088	0,224	0,366
$\Delta A, \text{Мдж}/\text{м}^3$	0,42	0,73	1,53	3,1	11,4	18,4	56	106
$A, \text{Мдж}/\text{м}^8$	0,42	1,15	2,68	5,78	17,2	35,6	91,6	197,6

Величини максимальної питомої роботи деформування в залежності від відносного внутрішнього радіуса згинання для сталей СтЗсп та 09Г2 наведені у табл.2.

**Таблиця 2 – Максимальна питома робота деформування**

Марка сталі	Значення питомої роботи деформування $A, \text{Мдж}/\text{м}^3$ , при $r_B$				
	0,1	0,25	0,5	1	2
СтЗсп	688	462	286	198	109
Сталь 09Г2	737	490	311	203	113

За даними табл. 2 побудовано залежність зміни питомої роботи деформування елементарного об'єму від відносного внутрішнього радіусу згинання (рис. 1). На цьому ж графіку у вигляді прямих ліній нанесено величини питомої роботи руйнування для сталей марок СтЗсп (1) і 09Г2 (2). Перетин кривої залежності питомої роботи деформування від відносного внутрішнього радіуса вигину з прямої критичної роботи руйнування дає критичне значення відносного внутрішнього радіуса згинання.

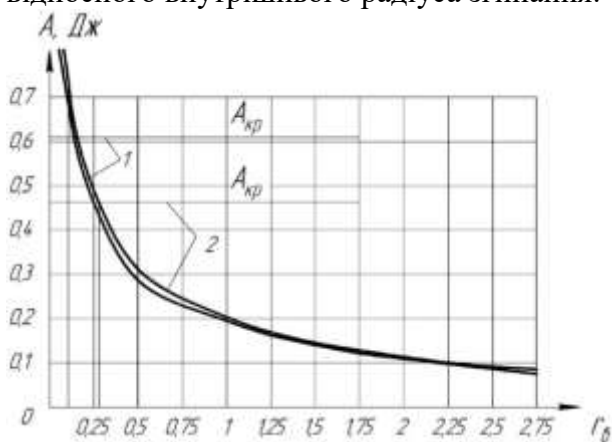


Рисунок 1 – Залежність питомої роботи деформування від відносного внутрішнього радіуса згинання:

1 – для сталі СтЗсп; 2 – для сталі 09Г2

З виразу (7) видно, що питома робота деформування залежить як від радіуса, але й від кута вигину. Залежність питомої роботи деформування від відносного внутрішнього радіуса згинання для кута згинання  $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$  наведена в табл. 2. Такі ж таблиці складені для різних значень кута  $\varphi_0$ . За отриманими даними побудовано графіки (рис. 2, рис. 3).

#### Визначення критичного радіуса руйнування

З рис. 2 та рис. 3 бачимо, що із зменшенням кута згинання питома робота деформування зменшується. Перетин кривих, що відповідають різним значенням кута  $\varphi_0$ , з прямими питомої критичної роботи руйнування дає значення критичних радіусів для різних кутів згинання заготовки.

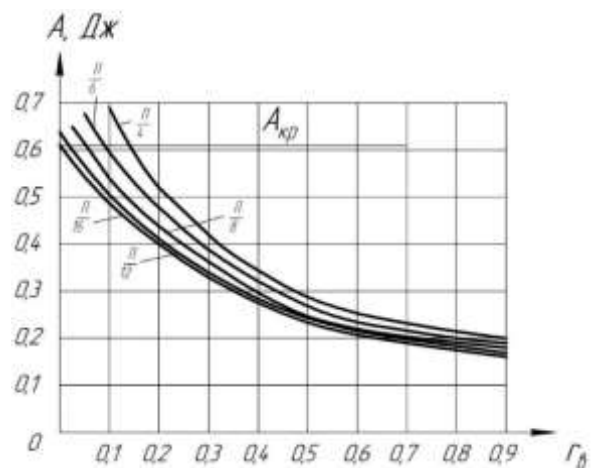


Рисунок 2 – Криві зміни питомої роботи деформування для сталі СтЗсп при різних значеннях кута згинання

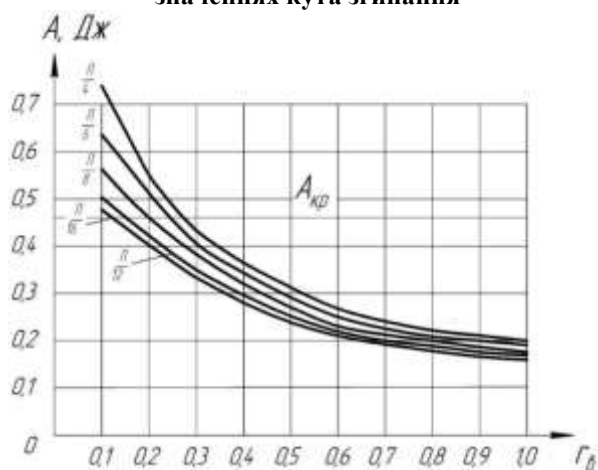


Рисунок 3 – Криві зміни питомої роботи деформування для сталі 09Г2 при різних значеннях кута згинання

У відповідності до отриманих даних побудований графік зміни критичного радіуса руйнування в залежності від кута згинання для різних марок сталі. Такий графік для сталей СтЗсп і 09Г2 наведено на рис. 4.

Оскільки всі розрахунки наведені у відносних величинах, радіус у досліджуваних випадках згинання необхідно визначати наступним чином: за заданим кутом згинання на готовому профілі за графіком (рис. 4) визначати критичні радіуси руйнування. Так, для рядових марок сталей (СтЗсп), при згинанні на  $90^\circ$   $r_k=0,16$ , для низьколегованих сталей (09Г2) за тих же умов  $r_k=0,27$ .

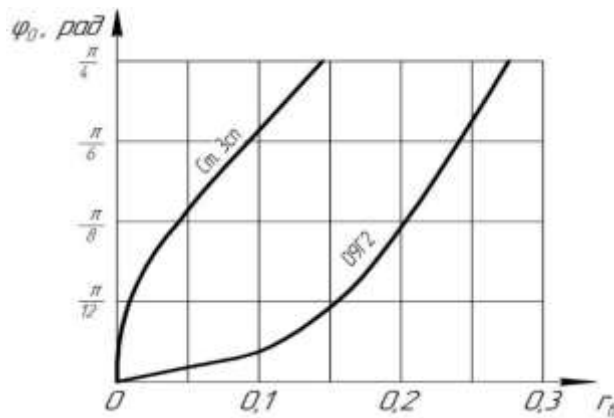


Рисунок 4 – Залежність критичного радіуса руйнування від кута згинання

Технологічні радіуси вигину від розрахункових значень коефіцієнтом запасу міцності. Отже, при безперервному процесі профілювання мінімальний допустимий радіус згинання визначається за залежністю

$$r_{\min} = (2,8 \div 3,5)kr_k. \quad (16)$$

При підгинанні полиць профілю до кута  $\varphi_0 = \pi/4$  радіуси повинні бути в наступних діапазонах:

а) для рядових марок сталей:

$$r_{\min} = 0,9 \div 1,1;$$

б) для низьколегованих марок сталей:

$$r_{\min} = 1,5 \div 1,9.$$

### Висновки

1. Методом механіки суцільних середовищ з використанням поля швидкостей переміщень визначено питому роботу деформування елементарного обсягу місця згинання при профілюванні. Питома робота деформування із зменшенням радіуса та збільшенням кута вигину зростає.

2. З порівняння питомої роботи деформування при згинанні з критичною роботою руйнування отримано критичний радіус руйнування  $r_k$ , який при згинанні на кут  $\varphi_0 = \pi/4$  дорівнює:

- для сталі Ст3сп  $r_k = 0,16$ ;

- для сталі 09Г2  $r_k = 0,27$ .

Зі збільшенням кута вигину величина критичного радіусу також збільшується.

3. Технологічні радіуси згинання повинні відрізнятися від розрахункових значень критичного радіусу згинання коефіцієнтом запасу міцності, тобто,

$$r_{\min} = kr_k.$$

4. При поштучному профілюванні, коли мають місце наклеп і задирки на кінцях смуги, відносний мінімальний внутрішній радіус згинання слід визначати за формулою:

$$r_{\min} = (2,8 \div 3,5)r_k.$$

### Список використаних джерел

1. Семко В.О. Сталеві холодноформовані тонкостінні конструкції: монографія. Полтава: ТОВ «АСМІ». 2017. 325 с.
2. Ніколаєв В.О. Калібрування прокатних валків: навчальний посібник. Запоріжжя: ЗДІА. 2015. 158 с.
3. Moghadam A.E. Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles. Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, Institute for Frontier Materials Deakin University. 2017. 159 p.
4. Mahajan P. FE Simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties. Steel Research International. 2021. Vol. 89. No. 5.
5. Halmos G.T. Roll Forming Handbook. - Boca Raton: Taylor&Francis. 2006. 583 p.
6. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in rollforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 88, No. 9-12. P. 2405-2415.

### References

1. Semko V.O. Steel cold-formed thin-walled structures: monograph. Poltava: LLC "ASMI". 2017. 325 p. [in Ukrainian]

2. Nikolaev V.O. Calibration of rolling rolls: tutorial. Zaporizhzhia: ZDIA. 2015. 158 p. [in Ukrainian]

3. Moghadam A.E. Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles. Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, Institute for Frontier Materials Deakin University. 2017. 159 p.

4. Mahajan P. FE Simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties. Steel Research International. 2021. Vol. 89. No. 5.

5. Halmos G.T. Roll Forming Handbook. - Boca Raton: Taylor&Francis. 2006. 583 p.

6. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in rollforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 88, No. 9-12. 2405-2415 pp.

**DEFINING THE POSSIBILITY OF  
FORMING THE MINIMAL RADIUS OF  
BENDS DURING ROLL FORMING**

O. Yu. Sievierin, Yu.O Pliesnetsov,  
S. Yu. Pliesnetsov

National Technical University "Kharkiv Polytechnic  
Institute";

2 Кургучова Ст., Kharkiv, 61002, Ukraine;  
e-mail: [serhii.pliesnetsov@khp.edu.ua](mailto:serhii.pliesnetsov@khp.edu.ua)

## АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ КОМПЛЕКСИ

УДК 681.5

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-53-59

### ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРИРОДООХОРОННОГО БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО СУДНА ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

*Б. М. Гордєєв, Ж. Ю. Буруніна, І. П. Сабуцький*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,  
проспект Центральний 3, м. Миколаїв, 54029, Україна;*

*e-mail: [bvs050803@ukr.net](mailto:bvs050803@ukr.net), [b.gordeev@amiko.ua](mailto:b.gordeev@amiko.ua), [sabutskyi1994@gmail.com](mailto:sabutskyi1994@gmail.com)*

У статті запропоновано науково-методологічне підґрунтя для розробки ефективних систем автоматичного керування природоохоронним безекіпажним надводним судном. Теоретичну основу утворює множина інформаційних моделей такого судна як об'єкта його автоматизації для основних режимів експлуатації. Аналіз режимів роботи природоохоронного судна показав, що його інформаційну модель можна представити у вигляді трьох основних складових: субмоделі внутрішніх інформаційних потоків, що функціонують на судні між складовими його обладнання, субмоделі зовнішніх інформаційних потоків, що описують канали обміну інформацією між судном і береговим центром керування, та субмоделі фізичних полів різної природи, які породжуються надводним судном та його корисним вантажем. Інформаційну субмоделі внутрішніх інформаційних потоків запропоновано створювати у складі інформаційних потоків від датчиків, що вимірюють гідрофізичні та гідрохімічні характеристики морського середовища, інформаційних потоків від навігаційних датчиків судна, що вимірюють параметри його руху як об'єкта автоматичного керування, інформаційних потоків системи керування основною енергетичною установкою судна та його рушійно-рульовою установкою, інформаційних потоків від датчиків діагностичної системи судна, які дають змогу контролювати її технічний стан та прогнозувати тривалість морської місії. Інформаційну субмоделі зовнішніх інформаційних потоків пропонується створювати у складі інформаційних потоків від сенсорів виконавчих механізмів і систем судна та його корисного вантажу, а також від сенсорів систем контролю та діагностики судна та корисного вантажу, інформаційних потоків, які утворюють сигнали дистанційного ручного чи автоматизованого керування судном, а також інформаційних потоків від системи документування процесу та результатів роботи. Інформаційну субмоделі фізичних полів різної природи, які породжує судно та його корисний вантаж, пропонується створювати у складі інформаційних потоків акустичних та гідроакустичних шумів механізмів судна та корисного вантажу, теплових та електромагнітних випромінювань судна, випромінювань його гідроакустичної апаратури. Отримана множина моделей може бути використана при розробці алгоритмічного та програмного забезпечення природоохоронного безекіпажного надводного судна як об'єкта автоматизації.

**Ключові слова:** безекіпажне надводне судно, автоматичне керування, інформаційна модель, інформаційний потік, природоохоронна місія.

The article proposes a scientific and methodological basis for the development of effective automatic control systems for an environmental unmanned surface vessel. The theoretical basis is formed by a set of information models of such a vessel as an object of its automation for the main operating modes. Analysis of the operating modes of an environmental vessel showed that its information model can be represented in the form of three main components: submodels of internal information flows that operate on the vessel between the components of its equipment, submodels of external information flows that describe the channels of information exchange between the vessel and the shore control center, and submodels of physical fields of various natures that are generated by the surface vessel and its payload. It is proposed to create an information submodel of internal information flows as a part of information flows from sensors measuring hydrophysical and hydrochemical characteristics of the marine environment, information flows from navigation sensors of the vessel measuring parameters of its movement as an object of automatic control, information flows of the control system of the main power plant of the vessel and its propulsion and steering system, information flows from sensors of the vessel diagnostic system, which allow to monitor its technical condition and predict the duration of the sea mission. It is proposed to create an information

submodel of external information flows as a part of information flows from sensors of actuators and systems of the vessel and its payload and from sensors of control and diagnostic systems of the vessel and payload, information flows that form signals of remote manual or automated control of the vessel, as well as information flows from the system of documenting the process and results of work. It is proposed to create an information submodel of physical fields of various natures generated by the vessel and its payload as part of information flows of acoustic and hydroacoustic noises of the vessel's mechanisms and payload, thermal and electromagnetic radiation of the vessel, and radiation of its hydroacoustic equipment. The resulting set of models can be used in the development of algorithmic and software support for an environmental unmanned surface vessel as an automation object.

**Keywords:** unmanned surface vessel, automatic control, information model, information flow, environmental mission.

### Вступ

Безекіпажні надводні судна (БНС, в англomовній літературі – Unmanned Surface Vessels, USV) є ефективним технічним засобом для дослідження океану [1-3]. За їх допомогою на цей час виконуються операції зі збору та передачі просторової інформації про морське середовище.

Досвід застосування засобів морської робототехніки у наукових і транспортних морських місіях свідчить, що до переваг застосування БНС порівняно з традиційними (пілотованими) технічними засобами вивчення океану відносяться [4-5]:

- виключення ризику для життя і здоров'я дослідників океану;
- можливість виконувати тривалі морські місії у найвіддаленіших акваторіях та у складних погодних умовах;
- низькі витрати на технічне обслуговування БНС у міжрейсовий період.

Сучасні властивості БНС як засобів морської робототехніки стали можливими завдяки широкому застосуванню у складі обладнання БНС компактних і дешевих систем зв'язку, навігації та контролю, сенсорів гідрофізичних і гідрохімічних характеристик морського середовища.

Разом з тим, практична експлуатація надводних і підводних засобів робототехніки вказує на низку проблем у їх технічних можливостях, серед яких зазначаються проблеми в системах інформаційного забезпечення – каналах інформаційного обміну і зв'язку, автоматичного керування тощо [6, 7].

БНС – це морський робот, який працює повністю автономно та має зв'язок

з береговим центром керування (БЦК). Важливою складовою робіт по вдосконаленню систем автоматичного керування такими роботами є розробка їх інформаційних моделей, оскільки вони утворюють теоретичне підґрунтя для аналізу особливостей функціонування морських роботів та синтезу високоефективних систем автоматичного керування ними.

Це обумовлює актуальність пропонованої статті.

### Теоретичне обґрунтування

Синтез високоефективних систем керування БНС ґрунтується на чіткому уявленні про режими його роботи, про джерела та споживачів інформації в цих режимах, про канали інформаційного обміну та особливості впливу зовнішнього середовища, у якому функціонує БНС. Науково-методологічною основою такого синтезу є інформаційна модель судна, яка, згідно із загальновідомими технічними уявленнями, являє собою систему сигналів, що характеризує динаміку об'єкта керування та описує його інформаційні потоки, стан самої системи керування та умови зовнішнього середовища [8].

Аналіз науково-технічної літератури за напрямком «інформаційні моделі суден» свідчить, що їх розробка та використання спостерігається у наступних основних напрямках:

- при плануванні, проектуванні та виконанні суднобудівних проектів у цілому [9];
- при плануванні сценаріїв промислового використання суден [10, 11];
- при розробках систем інформаційної безпеки транспортних суден [12];

– при модернізації суден з метою покращення їх автономних навігаційних функцій, таких як контроль курсу, слідування шляху та уникнення зіткнень [13].

Так, у роботі [9] показано, що інформаційне моделювання суден змінює спосіб планування, проектування та виконання суднобудівних проектів. Використовуючи цифрові моделі для візуалізації та симуляції суден, що будуються, досягається більша ефективність та точність будівельних робіт. Однак питання аналізу інформаційних потоків при керуванні судном роботі не розглядаються.

У статтях [10, 11] розглядаються питання аналізу інформаційних потоків при, відповідно, керуванні логістичними процесами транспортного ланцюга «залізничний контейнер – судно» та керуванні процесами інформаційного обміну всередині групи рибпромислових суден. Однак описані моделі не враховують особливості автоматичного керування суднами, які виконують природоохоронні місії.

Стаття [12] присвячена розробці та впровадженню прототипової моделі-дефініції «Інформаційна безпека судна», що призначена для поліпшення інформаційної безпеки судноплавства. Проте питання створення комплексної моделі функціонування судна автор не розглядає.

Досить близькою до створення повнофункціональної інформаційної моделі судна є стаття [13], у якій автор описує інформаційну модель процесу модернізації морської яхти, включаючи механічну модернізацію, перепроєктування апаратного забезпечення, розгортання програмного забезпечення та функціональне тестування. Модернізація системи керування передбачає забезпечення автономних навігаційних функцій, таких як контроль курсу, слідування шляху та уникнення зіткнень. Однак питання інформаційного

моделювання повного переліку режимів роботи яхти та особливості інформаційного забезпечення роботи з корисним вантажем і процесами зв'язку з береговим центром керування автор не досліджує.

Таким чином, відомості про інформаційні моделі як суден загального призначення, так і природоохоронних суден у сучасній науково-технічній літературі відсутні.

Тому метою роботи є розробка множини інформаційних моделей природоохоронного безекіпажного надводного судна як об'єкта його автоматизації для основних режимів його експлуатації.

Інформаційну модель БНС будемо створювати методом аналізу його внутрішніх і зовнішніх інформаційних потоків для повного набору режимів його роботи. Для аналізу особливостей режимів роботи БНС використаємо метод узагальнення і класифікації.

Безекіпажне надводне судно природоохоронного призначення є носієм корисного вантажу – вимірювальних приладів та приладів для відбору проб води і повітря у заданих точках акваторій, які досліджуються. Інформаційне забезпечення функціонування БНС має виконувати наступні дві основні функції:

– ручне дистанційне, автоматизоване дистанційне та автоматичне керування виконавчими механізмами БНС в усіх режимах його роботи (інформаційне забезпечення процесів керування, які протікають всередині БНС);

– комунікацію (зв'язок за допомогою радіотелеметрії) між БНС та БЦК, звідки реалізується загальне керування морською місією судна і де виконується обробка отриманої інформації про морське середовище.

Особливістю першої функції БНС є необхідність формувати інформаційні масиви як для, власне, виконавчих механізмів БНС з метою їх належного функціонування та використання БНС за

призначенням, так і для БЦК з метою повного контролю операторами БНС його технічного стану на протязі усієї місії.

До особливостей другої функції БНС слід віднести:

- можливість передачі до БЦК контрольної інформації про технічний стан виконавчих механізмів БНС та його корисного вантажу, про зовнішню гідрологічну, кліматичну та навігаційну обстановку на протязі місії (телеметрична інформація);

- можливість прийому команд (сигналів керування) від БЦК для виконавчих механізмів БНС та корисного вантажу при ручному дистанційному та автоматизованому дистанційному керуванні ними в усіх режимах роботи судна.

Виходячи з наведених загальних вимог до інформаційного забезпечення БНС, розглянемо основні принципи побудови його інформаційної моделі як дистанційно вручну та автоматично керованого засобу морської робототехніки.

Згідно з загальновідомими технічними уявленнями, термін «інформаційна модель» означає систему сигналів, які свідчать про динаміку об'єкта керування, та описує його інформаційні потоки, стан самої системи керування та умови зовнішнього середовища [8].

Таким чином, у нашому випадку під інформаційною моделлю БНС  $IM_{USV}$  будемо розуміти:

- внутрішні інформаційні потоки  $I_I = \{I_{IS-USV}; I_{IS-P}; I_{IS-CDS-USV}; I_{IS-CDS-P}; I_{IC-USV}; I_{IC-P}\}$ , які мають місце всередині БНС і забезпечують функціонування безпечного надводного судна та його корисного вантажу:

- інформація  $I_{IS-USV}$  від сенсорів виконавчих механізмів самого безпечного надводного судна;

- інформація  $I_{IS-P}$  від сенсорів корисного вантажу БНС – науково-дослідного обладнання, призначеного для дослідження водного та повітряного середовища;

- інформація  $I_{IS-CDS-USV}$  та  $I_{IS-CDS-P}$  від сенсорів систем контролю та діагностики БНС та його корисного вантажу (Control and Diagnostic Systems, CDS);

- сигнали керування  $I_{IC-USV}$  виконавчими механізмами БНС;

- сигнали керування  $I_{IC-P}$  корисним вантажем БНС;

- зовнішні інформаційні потоки  $I_E = \{I_{E-T}; I_{E-C}; I_{E-D}\}$ , які характерні для каналів обміну інформацією між системою комунікації (зв'язку) БНС та пристроями БЦК:

- телеметрична інформація  $I_{E-T}$  від сенсорів усіх механізмів і систем БНС та його корисного вантажу, а також від сенсорів систем контролю та діагностики БНС та його корисного вантажу;

- сигнали  $I_{E-C}$  дистанційного ручного чи автоматизованого керування БНС в усіх режимах його функціонування за призначенням;

- інформація  $I_{E-D}$  від системи документування процесу та результатів роботи БНС.

Крім вказаних двох видів інформаційних потоків, специфіка застосування БНС вимагає урахування ще одного виду його зовнішніх інформаційних потоків  $I_F$  – інформації про фізичні поля різної природи, які генеруються (випромінюються) судном та його корисним вантажем та негативно впливають на природне середовище.

У загальному вигляді, до множини таких потоків інформації необхідно віднести:

- акустичні  $I_{F-AN}$  та гідроакустичні  $I_{F-HN}$  шуми механізмів БНС та корисного вантажу;

- теплові  $I_{F-T}$  та електромагнітні  $I_{F-EM}$  випромінювання БНС, а також випромінювання його гідроакустичної апаратури  $I_{F-HA}$ .

Вказані інформаційні потоки утворюються під час функціонування БНС та його корисного вантажу і мають бути контрольованими через загрози негативного впливу на морське середовище під час виконання морської місії.

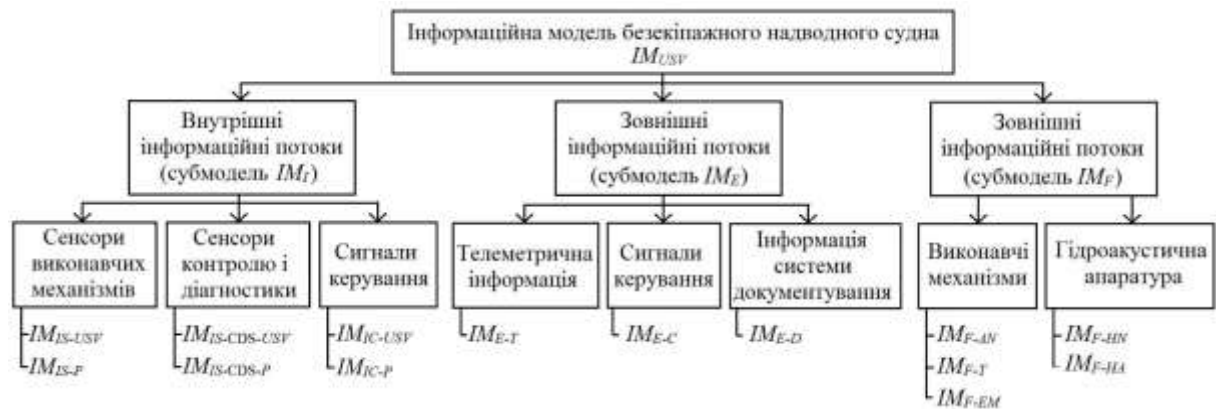


Рисунок 1 - Інформаційна модель безпечного надводного судна  $IM_{USV}$

Тоді, у загальному вигляді, інформаційну модель БНС  $IM_{USV}$  можна представити у вигляді трьох основних складових – субмоделей (індексні позначення інформаційних субмоделей співпадають з індексними позначеннями інформаційних потоків):

$$IM_{USV} = \{IM_I; IM_E; IM_F\} = \\ = \{IM_{IS-USV}; IM_{IS-P}; IM_{IS-CDS-USV}; IM_{IS-CDS-P}; \\ IM_{IC-USV}; IM_{IC-P}; IM_{E-T}; IM_{E-C}; IM_{E-D}; \\ IM_{F-AN}; IM_{F-HN}; IM_{F-T}; IM_{F-EM}; IM_{F-HA}\},$$

де  $IM_I$  – інформаційна субмодель внутрішніх потоків інформації БНС, які циркулюють між обладнанням всередині судна;

$IM_E$  – інформаційна субмодель зовнішніх інформаційних потоків БНС, характерних для каналів обміну інформацією між БНС та пристроями БЦК;

$IM_F$  – інформаційна субмодель фізичних полів різної природи, які породжуються БНС та його корисним вантажем і негативно впливають на навколишнє середовище.

Таким чином, внутрішні  $I_I$  та зовнішні  $I_E$  інформаційні потоки БНС, а також інформаційні потоки  $I_F$  його фізичних полів належать до важливих складових при формуванні інформаційної моделі БНС.

Узагальнена структура інформаційної моделі БНС наведена на рис. 1.

Розглянемо особливості розробки інформаційних моделей БНС для наступних основних експлуатаційних режимів  $R_{БНС}$ :

– підготовка до місії в умовах берегового базування (тестовий режим  $R_{Test1}$ );

– перехід у задану точку акваторії для виконання заданої природоохоронної місії (режим  $R_{Trip1}$ );

– виконання місії надводних досліджень водного середовища (морська операція  $SO_{SR}$ , режим  $R_{SR}$ );

– виконання місії підводних досліджень водного середовища (морська операція  $SO_{UR}$ , режим  $R_{UR}$ );

– перехід у задану точку акваторії після виконання заданої місії (режим  $R_{Trip2}$ );

– обробка результатів виконання заданої природоохоронної місії в умовах берегового базування (режим  $R_{PR}$ );

– діагностика обладнання БНС та його корисного вантажу в умовах берегового базування (тестовий режим  $R_{Test2}$ ).

Тобто, для кожного експлуатаційного режиму множини  $R_{USV}$  (2) завдання розробки інформаційних моделей БНС може бути представлене наступною множиною «режимних» інформаційних моделей (3), які відображають особливості інформаційних потоків для кожного режиму функціонування БНС:

$$R_{USV} = \{R_{Test1}; R_{Trip1}; R_{SR}; R_{UR}; R_{Trip2}; \\ R_{PR}; R_{Test2}\}, \quad (2)$$

$$IM_{USV} = \{IM_{Test1}; IM_{Trip1}; IM_{SR}; IM_{UR}; \\ IM_{Trip2}; IM_{PR}; IM_{Test2}\}. \quad (3)$$

Очевидно, що завдання розробки інформаційної моделі БНС необхідно розглядати комплексно, тобто, з урахуванням множин (2)-(3).

Запишемо повну множину  $IM_{USV}$  інформаційних моделей БНС як носія корисного вантажу для дослідження водного середовища у вигляді матриці розміром  $[3 \times 7]$ :

$$IM_{USV} =$$

Режими Суб- моделі	$R_{Test}$	$R_{Trip1}$	$R_{SR}$	$R_{UR}$	$R_{Trip2}$	$R_{PR}$	$R_{Test2}$
$IM_I$	$IM_{I-Test}$	$IM_{I-Trip1}$	$IM_{I-SR}$	$IM_{I-UR}$	$IM_{I-Trip2}$	$IM_{I-PR}$	$IM_{I-Test2}$
$IM_E$	$IM_{E-Test}$	$IM_{E-Trip1}$	$IM_{E-SR}$	$IM_{E-UR}$	$IM_{E-Trip2}$	$IM_{E-PR}$	$IM_{E-Test2}$
$IM_F$	$IM_{F-Test}$	$IM_{F-Trip1}$	$IM_{F-SR}$	$IM_{F-UR}$	$IM_{F-Trip2}$	$IM_{F-PR}$	$IM_{F-Test2}$

Очевидно, що кожен елемент матриці  $IM_{USV}$  – це підмножина інформаційних моделей, яка згідно (1) містить шість, три і п'ять інформаційних моделей відповідно для першого, другого і третього рядків матриці.

Таким чином, множина  $IM_{USV}$  утворює перелік прикладних робіт зі створення базових («режимних») інформаційних моделей БНС як об'єкта автоматизації та носія корисного вантажу для дослідження водного середовища.

У цілому, отримані результати утворюють теоретичне підґрунтя для аналізу особливостей функціонування та синтезу вдосконалених інформаційних систем морських роботів такого типу.

Зауважимо, що структурно більшість інформаційних моделей матричної множини  $IM_{USV}$  для всіх семи основних режимів роботи є однотипними, оскільки типовий БНС має скінчений перелік сенсорів і виконавчих механізмів, які постійно задіяні при практичній реалізації цих п'яти режимів роботи судна.

Проте, тільки синтез та наступний порівняльний аналіз базових моделей вказаної множини з позицій інформаційної складності дасть змогу отримати найбільш повну інформаційну модель БНС як носія корисного вантажу для дослідження водного середовища.

Таким чином, за своїми властивостями інформаційна модель безекіпажного надводного судна – це джерело відомостей про істотні для розгляду даного об'єкту

робототехніки параметри та змінні величини, які характеризують зв'язки між цими параметрами і змінними у процесі функціонування БНС та які дають змогу виконувати подальше проектування ефективних систем керування судном.

Отримана множина інформаційних моделей БНС описує основні інформаційні властивості БНС як джерела просторової інформації та як джерела і споживача керуючої інформації, яка забезпечує автоматичне функціонування морського робота такого типу. Отриманий перелік (множина) інформаційних моделей може бути використаний при розробці спеціального алгоритмічного та програмного забезпечення безекіпажних надводних катерів, які призначені для виконання природоохоронних місій.

## Висновки

Розглянуто призначення та основні режими роботи природоохоронного безекіпажного надводного судна як засобу морської робототехніки, що виконує приладове дослідження водного середовища й функціонує в ручному, автоматизованому та повністю автоматичному режимах.

Запропоновано множину інформаційних моделей безекіпажного надводного судна у складі моделей внутрішніх і зовнішніх інформаційних потоків, що утворює теоретичну основу розробки інформаційного забезпечення систем автоматичного керування надводними засобами робототехніки.

## Список використаних джерел / References

1. Manley J. E. Unmanned surface vehicles, 15 years of development. *OCEANS 2008*, Quebec City, QC, Canada. 2008. P. 1-4. DOI: [10.1109/OCEANS.2008.5152052](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2008.5152052)
2. Dobref V., Popa I., Popov P., Scurtu I. C. Unmanned Surface Vessel for Marine Data Acquisition. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. June 2018.

Vol. 172. 012034. DOI: [10.1088/1755-1315/172/1/012034](https://doi.org/10.1088/1755-1315/172/1/012034)

3. Sotelo-Torres F., Alvarez L.V., Roberts R.C. An Unmanned Surface Vehicle (USV): Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys. *Sensors*. 2023. Vol. 23 4420. DOI: [10.3390/s23094420](https://doi.org/10.3390/s23094420)

4. Othman E. H. A Review on Current Design of Unmanned Surface Vehicles (USVs). *Journal of Advanced Review on Scientific Research*. 2015. Vol. 16. No.1. P. 12-17.

5. Blintsov V., Aloba L. T. Control automation of maritime unmanned complex with a group of autonomous underwater vehicles. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. No.4. P. 54-62. DOI: [10.21303/2461-4262.2019.00940](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00940)

6. Blintsov V., Maidaniuk P., Sirivchuk A. Improvement of Technical Supply of Projects of Robotized Monitoring of Underwater Conditions in Shallow Water Areas. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. No.3. P. 41-49.

7. Zhixiang Liu, Youmin Zhang, Xiang Yu, Xiang Yu. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*. 2016. Vol. 41. P. 71-93. DOI: [10.1016/j.arcontrol.2016.04.018](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018)

8. Information model. [https://uk.wikipedia.org/wiki/інформаційна\\_модель](https://uk.wikipedia.org/wiki/інформаційна_модель) [in Ukrainian]

9. 5 Ways Ship Information Modeling (SIM) is Revolutionizing Shipbuilding Projects. <https://naval-architect.io/ship-information-modeling-sim/>

10. Elbert R., Walter F. Information flow along the maritime transport chain – a simulation based approach to determine impacts of estimated time of arrival messages on the capacity utilization. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Savannah, GA, USA. 2014. P. 1795-1806. DOI: [10.1109/WSC.2014.7020028](https://doi.org/10.1109/WSC.2014.7020028)

11. Little L.R., Kuikka S., Punt A.E., Pantus F., Davies C.R., Mapstone B.D. Information flow among fishing vessels modelled using a Bayesian network. *Environmental Modelling & Software*. 2004. Vol. 19. Iss. 1. P. 27-34. DOI: [10.1016/S1364-8152\(03\)00100-2](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00100-2)

12. Vilsky G. Model-definition "Information security of a ship". *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2018. Vol. 24. No 3. P. 217-220. DOI: [10.18372/2225-5036.24.13432](https://doi.org/10.18372/2225-5036.24.13432) [in Ukrainian]

13. You X., Ma F., Liu J., Wang, X., Yan X. Retrofit an 11-meter yacht for autonomous navigation. *Proceedings of the International Ship Control Systems Symposium (iSCSS)*. 2020. 11126. DOI: [10.24868/issn.2631-8741.2020.012](https://doi.org/10.24868/issn.2631-8741.2020.012)

#### **INFORMATION MODEL OF AN UNMANNED SURFACE VESSEL AS AN OBJECT OF AUTOMATION**

B. M. Gordieiev, Zh. Yu. Burunina, I. P. Sabutskyi

Admiral Makarov National Shipbuilding University,  
3 Centralnyi Avenue, Mykolaiv, 54029, Ukraine;  
e-mail: [bvs050803@ukr.net](mailto:bvs050803@ukr.net), [b.gordeev@amiko.ua](mailto:b.gordeev@amiko.ua),  
[sabutskyi1994@gmail.com](mailto:sabutskyi1994@gmail.com)

УДК 681.5

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-60-68

## СИСТЕМА ОСВІТЛЕННЯ ВИРОБНИЧОГО ПРИМІЩЕННЯ КОМБІНОВАНОГО ТИПУ

*Н. І. Артюх, М. Ю. Єлісєєв*

*Національний університет водного господарства та природокористування;*

*вул. Соборна, 11, м. Рівне, Рівненська область, 33000, Україна;*

*e-mail: n.i.kulik@niuwm.edu.ua*

В ході дослідження проведено аналіз літературних джерел, що стосуються проблеми автономних систем освітлення на основі відновних джерел енергії. Здійснено аналіз законодавчої бази стосовно політики енергозбереження в Україні. Розглянута проблематика енергопостачання виробничих приміщень в умовах недостатнього генерування електроенергії та запропонований варіант енергопостачання, який базується на використанні “зеленої” енергетики: сонячної, вітрової енергії та п'єзоелектрики з можливістю отримання резервного живлення від загальної системи енергопостачання у разі недостатнього генерування за допомогою альтернативних джерел електричної енергії. Запропоновано систему освітлення виробничих приміщень за допомогою світлодіодних джерел світла. Спроектовано ефективну систему робочого та місцевого освітлення приміщення, і вказано план розташування світлових пристроїв і обрано їх електричні характеристики. Для запобігання занадто частому спрацюванню фотореле пропонується використовувати світильники місцевого освітлення з димерним регулюванням, за допомогою яких можна збільшувати освітленість робочого місця у необхідному діапазоні, запобігаючи таким чином спрацюванню фотореле і вмиканню світильників загального освітлення на повну потужність. Для накопичення електричної енергії, яка не буде спожита для виробничих потреб, запропоновано використати акумуляторні пристрої з інтелектуальним керуванням, так звані зарядні станції. Запропоновано рішення для системи живлення аварійного освітлення. Для функціонування системи евакуаційного, чергового та охоронного освітлення пропонується застосовувати світильники, що акумулюють світло протягом дня або протягом періоду освітлення виробничого приміщення за допомогою загальної системи освітлення.

**Ключові слова:** система освітлення, виробниче приміщення, сонячна батарея, фотопанель, фотовольтаїка, вітрогенератор, п'єзоелектрика, п'єзоплитка, фотореле, акумуляторна батарея, зарядна станція, світлодіоди, LED-лампи, “зелена” енергетика, альтернативні джерела електроенергії, енергозбереження, енергоефективність.

In the course of the study, an analysis of literary sources related to the problem of autonomous lighting systems based on renewable energy sources was carried out. An analysis of the legislative framework for energy saving policy in Ukraine was carried out. The problem of energy supply for industrial premises in conditions of shortage of electricity generation and the proposed option of energy supply, which is based on the use of green energy: solar, wind energy and piezoelectricity with the possibility of receiving backup power from the general energy supply system in the event of a shortage of generation using alternative sources of electricity, are considered. A lighting system for industrial premises using LED light sources is proposed. An effective system of working and local lighting of the room was designed and the location plan of lighting devices was indicated and their electrical characteristics were selected. In order to prevent too frequent operation of the photo relay, it is suggested to use local lighting lamps with dimmer control, which can be used to increase the illumination of the workplace in the required range, thus preventing the operation of the photo relay and turning on the general lighting lamps at full power. In order to accumulate electrical energy that will not be consumed for production needs, it is proposed to use battery devices with intelligent control, so-called charging stations. A solution for the emergency lighting power system is proposed. For the operation of the evacuation, duty, and security lighting system, it is suggested to use lamps that accumulate light during the day or during the period of illumination of the production premises with the help of a general lighting system.

**Keywords:** lighting system, production premises, solar battery, photo panel, photovoltaics, wind generator, piezoelectricity, piezo tile, photo relay, battery, charging station, LEDs, LED lamps, green energy, alternative sources of electricity, energy saving, energy efficiency.

## Вступ

Головною енергетичною проблемою у нашій країні на сьогодні є нестача електрогенерації внаслідок терористичних атак на енергетичні об'єкти країни, насамперед на теплові та гідроелектростанції, а також обладнання для трансформації та передачі електричної енергії. Тому, у так звані пікові години створюється дефіцит електроенергії, який змушує енергопостачальні підприємства вдаватись до планових та навіть аварійних відключень споживачів, інколи навіть споживачів I та II-ї категорій. Для значного збільшення генерації електричної енергії на сьогодні немає ані відповідних технічних та економічних ресурсів, ані часу, оскільки реалізація складних проєктів із будівництва теплових, гідроелектростанцій та нових ядерних реакторів на діючих АЕС триває роками. Тобто, вирішувати енергетичні питання країни потрібно негайно, і для цього є лише два варіанти: суттєве заощадження споживання та значне збільшення обсягів генерації електричної енергії, тому що спроможності у імпорті електроенергії з сусідніх країн обмежені і вже використовуються на повну потужність. До того ж, відмова від теплових електростанцій – це світова тенденція, яка пов'язана із необхідністю зменшення викиду парникових газів у атмосферу, які у значних кількостях утворюються при роботі теплових електростанцій, а отже, недопущення подальшого росту температури на планеті, що призводить до масштабування стихійних лих та підвищення рівня Світового океану. Прагнення до відмови від ядерної енергетики пов'язане із гіпотетичною можливістю виникнення техногенних катастроф, в тому числі і внаслідок терористичних атак на ядерні енергетичні об'єкти, що може призвести до радіоактивного забруднення ядерним паливом значних територій, а також відсутністю ефективних технологій для переробки відпрацьованого ядерного

палива, що призводить забруднення навколишнього середовища, через створення нових сховищ для збереження ядерних відходів.

**Мета роботи** – розробити систему освітлення за допомогою енергоефективних джерел світла; обґрунтувати систему електропостачання альтернативними джерелами енергії.

## **Аналіз основних досліджень і публікацій**

На сьогодні існує значна кількість публікацій та наукових досліджень які висвітлюють переваги та недоліки так званої зеленої енергетики, а також необхідність відмови у подальшому використанні викопного та ядерного палива. Схожа із запропонованою для розгляду у даній статті система освітлення описана у статті [1]. Автори статті наводили аргументи на користь того, що для автономної системи освітлення недостатньо лише фотоелектричних панелей, а для безперервної генерації електроенергії необхідно також використовувати вітрогенератори. Крім того, у статті була обґрунтована переваги влаштування системи освітлення за допомогою світлодіодних ламп.

Енергоощадна політика підтримується в Україні на державному рівні, про що свідчать закони та нормативні документи [2-4].

## **Висвітлення основного матеріалу статті**

Впровадження енергоощадних технологій та генерація електроенергії з використанням альтернативних джерел її генерації є вимушеним кроком, а не технічним рішенням для заощадження бізнесом коштів на електроспоживанні після впровадження таких технологій на виробництві. Тому для успішної реалізації державної стратегії із вирішення поточних енергетичних проблем та будівництва електроенергетичної системи, стійкої до зовнішніх впливів, потрібно створити чи доопрацювати законодавчу базу країни у сфері електроенергетики, вимог до

електрообладнання, освітлення, тривалості робочого дня тощо, а також, можливо, прийняти так звані непопулярні рішення, спрямовані на пришвидшення переходу підприємств виробничої чи невиробничої сфери, офісних центрів, держустанов до енергоощадних технологій та малої генерації електроенергії.

При відповідній політиці контролю та заохочення державою процесу переходу на енергоощадні технології та механізми самовиробництва електричної енергії можна створити умови, за яких заощадження електроенергії та її генерація за допомогою альтернативних джерел електроенергії за потужністю буде дорівнювати, наприклад, блоку АЕС, який не доведеться будувати, а заощаджені на це кошти з державного бюджету можна спрямувати на подальше впровадження енергоефективних технологій та використання альтернативних джерел електроенергії.

Одним з таких заходів щодо енергозбереження та додаткової генерації електроенергії з подальшим перенаправленням її у загальну енергосистему країни може бути система освітлення виробничих приміщень, розглянути основні переваги якої пропонується у даній статті. Слід зазначити, що для освітлення саме виробничих приміщень за різними джерелами витрачалось 20–40 % від всього річного енергоспоживання. Якщо припустити, що завдяки вже впровадженню енергозберігаючим технологіям на сьогодні вдалося скоротити цей відсоток до 10, то загальнорічна кількість електроенергії, яка витрачається на освітлення виробничих приміщень, складає приблизно 15 млрд кВт·год на рік або 1,25 млрд кВт·год на місяць. Даний розрахунок здійснений на підставі електроспоживання країни у 2018–2021 роках. Тому скорочення споживання електроенергії на освітлення виробничих приміщень та додавання додаткової генерації для цих виробничих приміщень

за рахунок альтернативних джерел електроенергії скоротить споживання електроенергії з енергосистеми країни. Для обчислення економії електроенергії від такого заощадження та отримання об'єктивних кількісних показників потрібно врахувати велику кількість чинників, у тому числі і непередбачуваних. Але безсумнівно, що значна економія електроенергії завдяки впровадженню розглянутій нижче системі освітлення виробничих приміщень буде мати місце.

Основна інноваційна ідея щодо системи освітлення виробничими приміщеннями (СОВП) полягає в тому, щоб поєднати у цій системі світлодіодні джерела світла з альтернативними джерелами електроенергії, перетворюючи цю систему в частково чи повністю енергонезалежну. Але, на відміну від пропозиції у статті [1], у якій йшлося про доповнення фотоелектричних панелей вітрогенераторами для того, щоб отримувати більшу кількість електричної енергії, яка має живити світлодіодні лампи освітлення, у СОВП, яку пропонується розглянути у даній статті, передбачено ще одне альтернативне джерело живлення – є акумуляторний пристрій з інтелектуальним керуванням, а загальне освітлення виробничого приміщення керується за допомогою реле часу та фотореле, яке вмикає та вимикає загальне освітлення в залежності від освітленості робочих місць за допомогою природного світла.

Для опису СОВП пропонується розглянути виробниче приміщення розміром 12х6 м, тобто 72 м<sup>2</sup>, висотою 3,4 м, одноповерхове, по довжині якого з обох боків влаштовані 7 вікон розміром 1х1 м та одне шириною 2х1 м. У виробничому приміщенні мають здійснювати трудову діяльність 8 працівників, робочі місця яких мають розташовуватись безпосередньо під вікнами для кращого освітлення робочого місця за допомогою зовнішнього освітлення. Оскільки у виробничому приміщенні передбачено виконання

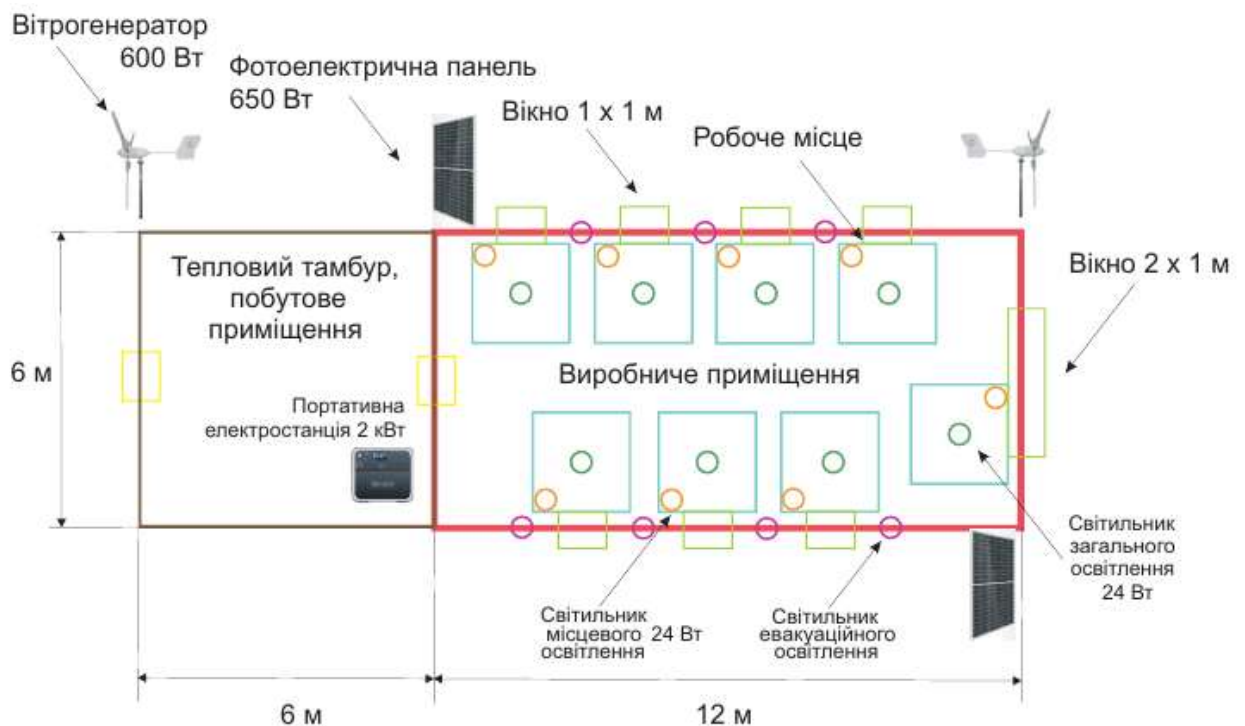


Рисунок 1 – План виробничого приміщення

зорової роботи дуже високої та високої точності, внутрішнє загальне освітлення забезпечує освітленість робочих поверхонь на висоті 0,8 м у 500 лк [5], а також на кожному робочому місці влаштоване місцеве освітлення. Загальне освітлення забезпечується за допомогою світлодіодних ламп номінальною потужністю 24 Вт, що знаходяться у підвісних світильниках, які встановлені над кожним робочим місцем на висоті 2,5 м і забезпечені механічною системою спуску/підйому як для регулювання нормативної освітленості на робочій поверхні, так і для проведення технічного обслуговування світильників та (або) заміни LED-ламп.

Місцеве освітлення реалізовано за допомогою світильників із аналогічними світлодіодними лампами, що і у світильниках загального освітлення, але з можливістю димерного регулювання. Тобто, світильники місцевого освітлення обладнані пристроєм для регулювання яскравості світла у відповідності до виробничих потреб, що, у свою чергу, зменшує енергоспоживання світлодіодних

ламп, а використання місцевого освітлення, на відміну від загального, триває протягом часу, необхідного для виконання певного виду робіт.

Джерелами електричної енергії для функціонування СОВП є дві фотоелектричні панелі номінальною потужністю 650 Вт, направлені на південний схід та північний захід, встановлені на кронштейнах, що дозволяють регулювати положення фотопанелей, а також два вітрогенератора номінальною потужністю 600 Вт, які встановлені на протилежних частинах даху. Враховуючи те, що виробники електротехнічної продукції вказують як номінальне максимально можливе значення відповідного параметра, необхідно припустити, що номінальна потужність як для фотоелектричних панелей, так і для вітрогенераторів буде 500 Вт, що загалом при найсприятливіших умовах для цих двох джерел електроенергії погодних умовах може у сумі дати 2 кВт електроенергії. Враховуючи те, що умовно півроку сонячної енергії для отримання визначених номінальних показників

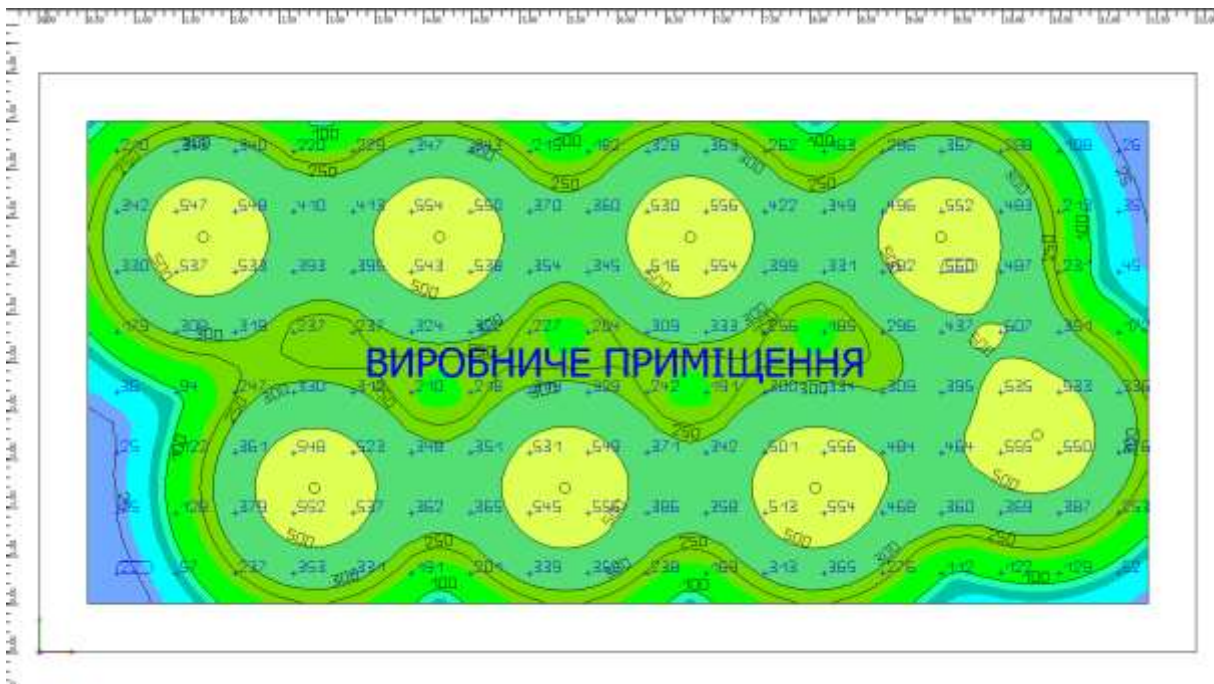


Рисунок 2 – Моделювання системи загального освітлення робочих поверхонь

генерації електроенергії фотопанелями буде недостатньо, а ще півроку буде недостатньо енергії вітру для отримання визначеної номінальної кількості електроенергії вітрогенераторами, середня кількість виробленої електроенергії для функціонування СОВП буде складати 1 кВт. Додаткову генерацію електроенергії можна забезпечити завдяки застосуванню для цього так званих п'єзопліток – електротехнічних пристроїв, які складаються з п'єзоелементів – пристроїв, при натисканні на які виникає електричний заряд. П'єзоплітка здатна виробляти 3–5 Вт електричної енергії за одне натискання, тобто один працівник, робоче місце якого буде обладнано таким електротехнічним пристроєм, здійснюючи, наприклад, одне натискання за хвилину здатен виробляти 240 Вт електроенергії за годину або близько 2 кВт протягом восьмигодинного робочого дня. Вісім працівників, як у прикладі, що розглядається, можуть за один робочий день генерувати близько 15 кВт електроенергії, і у даному випадку йдеться лише про випадкові натискання на п'єзоплітки.

У запропонованій для розгляду системі освітлення виробничого приміщення задіяно 16 світлодіодних ламп, загальною потужністю 384 Вт, і це за умови, коли всі ці лампи будуть увімкнені одночасно. Як вже було зазначено раніше, 8 світлодіодних ламп, призначених для забезпечення місцевого освітлення робочих місць, будуть вмикатися лише за потреби і вимикатися після виконання певної зорової роботи.

Світлодіодні лампи загального освітлення також будуть вмикатися за потреби, але у цьому випадку за потреби у забезпеченні нормативної освітленості робочої поверхні. Для цього на робочих поверхнях мають бути встановлені датчики освітленості, що вмикатимуть та вимикатимуть світлодіодну лампу, яка знаходиться безпосередньо над робочим місцем, в залежності від того, яка освітленість забезпечується завдяки природному освітленню у певний момент часу. У випадку, що розглядається, коли нормативна освітленість робочого місця має бути 500 лк, фотореле має вмикати лампу загального освітлення при зниженні освітленості до 450 лк і вимикати, коли

освітленість робочого місця буде перевищувати, наприклад, 600 лк.

Розрахунок встановленої потужності освітлювальної системи знайдемо за виразом  $P_{вст}$ , Вт.

$$P_{вст.о} = k_{пра} \cdot P_l \cdot n,$$

де  $k_{пра}$  – коефіцієнт, що враховує потужність пускових приладів залежно від джерела світла (для світлодіодних ламп  $k_{пра} = 1,1$ );  $P_l$  – потужність однієї лампи;  $n$  – кількість ламп.

Для запобігання занадто частому спрацюванню фотореле пропонується використовувати світильники місцевого освітлення з димерним регулюванням, за допомогою яких можна збільшувати освітленість робочого місця у необхідному діапазоні, таким чином запобігаючи спрацюванню фотореле і вмиканню світильників загального освітлення на повну потужність.

Сума активної  $P_{p.o}$ , реактивної  $Q_{p.o}$  та повної  $S_{p.o}$  потужності робочого освітлювального навантаження цеху визначається за формулою:

$$P_{p.o} = K_{n.o} \cdot P_{вст.о},$$

де  $K_{n.o}$  – коефіцієнт попиту загального освітлення, що для порівняно невеликих приміщень приймається  $K_{n.o} = 0,8$

$$Q_{p.o} = P_{p.o} \cdot \operatorname{tg} \phi_o,$$

$$S_{p.o} = \sqrt{P_{p.o}^2 + Q_{p.o}^2},$$

де  $\operatorname{tg} \phi_o$  обраховується за формулою за коефіцієнтом  $\cos \phi_o$  освітлювального навантаження, для світлодіодних ламп  $\cos \phi_o = 0,95$ .

Для обчислення розрахункового струму  $I_{p.o}$  робочого освітленого навантаження скористаємося формулою:

$$I_{p.o} = \frac{S_{p.o}}{\sqrt{3} \cdot U_n},$$

де  $U_n$  – номінальна напруга мережі.

**Таблиця 1 – Рівні освітленості робочих місць**

Робоче місце	E <sub>max</sub> , Лк	E <sub>min</sub> , Лк	Еср, Лк
1	548	319	433
2	554	324	439
3	556	309	432
4	560	296	428
5	555	336	445
6	556	313	434
7	556	339	447
8	548	237	392

Також, для зменшення освітленості робочого місця і запобігання занадто частим спрацювання фотореле у даному випадку для вимкнення світильника загального освітлення необхідно використовувати механічну підвісну систему світильників загального освітлення, про яку йшлося раніше, і, таким чином, зменшувати освітленість робочого місця до нормативної. Для максимально ефективного використання природного освітлення робочих місць тривалість робочого дня має співвідноситися з тривалістю світлового дня, а саме робочий день в осінньо-зимовий період повинен розпочинатися пізніше і закінчуватися раніше, ніж у весняно-літній, коли робочий день має розпочинатися раніше і закінчуватися пізніше. Вмикатися і вимикатися загальне освітлення повинно за допомогою реле часу, в тому числі у встановлені правилами внутрішнього трудового розпорядку перерви, що забезпечить раціональне споживання електроенергії. Тобто, враховуючи вищенаведені заходи з енергозбереження, СОВП буде споживати електричної енергії значно менше номінальних 384 Вт, як визначено у прикладі, що розглядається. При цьому дві фотоелектричні панелі та два вітрогенератори, про які йшлося вище, будуть виробляти щонайменше 1 кВт електроенергії. Різницю між виробленою електроенергією та спожитою для роботи СОВП можна використовувати для інших виробничих потреб, наприклад, для

живлення ще й електричних розеток, до яких може бути під'єднане виробниче обладнання, електроінструмент, оргтехніка відповідної потужності.

Для накопичення електричної енергії, яка не буде спожита для виробничих потреб, і, взагалі, для стабільної і надійної роботи СОВП пропонується використовувати акумуляторні пристрої з інтелектуальним керуванням, так звані зарядні станції, які вже два роки активно застосовуються у нашій країні та представлені на вітчизняному ринку електротехнічної продукції у різноманітних конфігураціях та цінових діапазонах. Для прикладу пропонується розглянути таку зарядну станцію номінальною вихідною потужністю у 2 кВт. Електроенергія, яка не буде спожита для виробничих потреб при досягненні максимального заряду акумуляторної батареї зарядної станції, буде спрямовуватись у загальну мережу. Крім того зарядна станція може бути запрограмована на передачу електроенергії у загальну мережу у так звані пікові години, коли у системі спостерігається дефіцит. Тобто, завдяки зарядній станції після завершення робочого дня кожен годину можна у автоматичному режимі спрямовувати певну кількість електроенергії, яка буде вироблена завдяки роботі фотоелектричних панелей та вітрогенераторів, в тому числі і у години пікових навантажень. Так само зарядний пристрій може бути запрограмований на самозарядження з загальної мережі, коли з певних причин за допомогою вищенаведених джерел електроенергії не вдається отримати визначену кількість електроенергії, але це може бути зроблено уночі, коли у загальній мережі зазвичай надлишок електроенергії.

Для забезпечення аварійного освітлення виробничого приміщення як джерело електричної енергії пропонується використовувати загальну електромережу, на живлення з якої буде автоматично перемикається СОВП у разі виходу з ладу

зарядної станції або коли з інших технічних причин чи виробничих буде необхідно отримати живлення з загальної мережі. При цьому для аварійного освітлення має бути використана описана вище система загального освітлення, тільки з аварійним живленням від загальної мережі. Для функціонування, за потреби, системи евакуаційного, чергового та охоронного освітлення пропонується застосовувати світильники, що акумулюють світло протягом дня або протягом періоду освітлення виробничого приміщення за допомогою загальної системи освітлення. Такі світильники будуть вмикатись у якості евакуаційного освітлення за допомогою фотореле, так званого сутінкового датчика, коли освітленість виробничого приміщення буде, наприклад, нижчою за 20 лк. Також ці світильники можуть бути використані для забезпечення чергового освітлення виробничого приміщення, якщо таке буде потрібно, використовуючи накопичену протягом освітленого періоду електроенергію для освітлення виробничого приміщення вночі та для охоронного освітлення, коли ці світильники будуть вмикатись за допомогою датчика руху. На сьогодні такі світильники представлені на вітчизняному ринку світлотехнічної продукції.

### **Висновки**

Використовуючи наявні на сьогодні розробки у електротехнічній галузі, можна не тільки задовольняти переважну більшість виробничих потреб у електроенергії за рахунок альтернативних джерел та енергоефективного використання, а й створити додаткові генеруючі електроенергію потужності. У разі контрольованого масштабування яких можна за кількістю електроенергії, що виробляється досягнути показників, наприклад, теплових електростанцій. Для цього має бути створена відповідна законодавча база, існуюча законодавча база повинна бути оновлена у відповідності до реалізації стратегії зі

створення значної кількості дрібних об'єктів електрогенерації, а також вжиті заходи зі стимулювання бізнесу на впровадження на виробництвах електрогенеруючих та енергозберігаючих технологій. В ідеальному випадку система генерації та передачі електроенергії у загальну мережу має бути автоматизована і працювати за алгоритмом "віддав - отримав", тобто електроенергія, яка була віддана у мережу через визначений проміжок часу, повинна бути у грошовому еквіваленті перерахована на розрахунковий рахунок підприємства, за мінусом вартості електроенергії, яка була спожита за цей період часу, або рахунок на сплату за спожиту електроенергію з загальної мережі автоматично має бути зменшений на вартість електроенергії, яка була туди віддана. Крім того, застосування наведених у цій статті електрогенеруючих та енергозберігаючих технологій або інших аналогічних ним мають бути обов'язковою вимогою чинного законодавства, порушення якого буде тягнути за собою адміністративну відповідальність, тобто значні штрафи. Таким чином, з одного боку, економічно стимулюючи, а з іншого боку, встановлюючи відповідні електроенергетичні вимоги до виробництв, можна отримати електрогенерацію, аналогічну втратам, понесеним внаслідок терористичних атак на енергетичні об'єкти нашої країни протягом останніх двох років. Також, завдяки такій державній політиці у сфері електроенергетики вже не буде потреби у будівництві морально застарілих теплових електростанцій.

#### Список використаних джерел

1. Литвиненко А., Діденко О., Васильєва Ю., Гуракова Л., Іоффе К. Автономна система освітлення гібридного типу. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2016. №1. С.12-18.
2. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 р. № 555-IV. *Відомості Верховної Ради України*. К., 2003.

No 24. С. 155. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=555-15>

3. Про внесення змін до Закону України «Про електроенергетику» щодо гарантування зобов'язань держави щодо стимулювання використання альтернативних джерел енергії: Постанова Верховної Ради України від 03 червня 2011 р. No 3486-17-ВР. *Відомості Верховної Ради України*. К., 2003. No 52. С. 378. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/3486-17.5>

4. Програма Державної підтримки розвитку нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії та малої гідро- і теплоенергетики: Постанова Кабінету Міністрів від 31 грудня 1997р. No1505. *Відомості Верховної Ради України*. К., 1997. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=1505-97-%EF>.

5. ДБН В.2.5-28-2018 "Природне і штучне освітлення".

#### References

1. Lytvynenko A., Didenko O., Vasylieva Yu., Hurakova L., Ioffe K. Avtonomna systema osvittlenia hibrydnoho typu. *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka*. 2016. No 1. P.12-18. [in Ukrainian]
2. Pro alternatyvni dzherela enerhii: Zakon Ukrainy vid 20.02.2003 r. No 555-IV. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*. K., 2003. No 24. P.155. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=555-15> [in Ukrainian]
3. Pro vnesennia zmin do Zakonu Ukrainy «Pro elektroenerhetyku» shchodo harantuvannia zoboviazan derzhavy shchodo stymuliuvannia vykorystannia alternatyvnykh dzherel enerhii: Postanova Verkhovnoi Rady Ukrainy vid 03chervnia 2011 r. No 3486-17-VR. *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*. K., 2003. No 52. P. 378. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/3486-17.5> [in Ukrainian]
4. Prohrama Derzhavnoi pidtrymky rozvytku netradytsiinykh ta vidnovliuvalnykh dzherel enerhii ta maloi hidro- i teploenerhetyky: Postanova Kabinetu

Ministriv vid 31 hrudnia 1997r. No1505.  
*Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*. K.,  
1997. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=1505-97-%EF> [in  
Ukrainian]

5. DBN V.2.5-28-2018 "Pryrodne i  
shtuchne osviltennia". [in Ukrainian]

**LIGHTING SYSTEM OF A COMBINED  
TYPE PRODUCTION PREMISES**

N. I. Artiukh, M. Yu. Yeliseiev

National University of Water Management and  
Environmental Management;  
11 Soborna St., Rivne, Rivne Region, 33000, Ukraine;  
e-mail: [n.i.kulik@nuwm.edu.ua](mailto:n.i.kulik@nuwm.edu.ua)

УДК 681.5

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-69-80

## АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ КОРИСНИМ ВАНТАЖЕМ БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО КАТЕРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

*В. А. Надточій, А. П. Бурунін*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова;  
проспект Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007, Україна; e-mail: nva074@gmail.com*

У статті відображено роль безекіпажних надводних катерів у задачах вивчення й використання морського середовища та його захисту від антропогенного впливу. Встановлено, що з кожним роком розширюється перелік корисного вантажу, який використовують з борта таких суден при дослідженні морського середовища. Це вимагає подальшого розвитку і вдосконалення систем автоматичного керування як безекіпажними суднами, так і керування їхнім корисним вантажем. На основі системного підходу до завдань, що виконують безекіпажні надводні судна, запропоновано класифікацію їх корисного вантажу з позицій подальшої автоматизації та показана доцільність його розміщення у спеціальних електрифікованих платформах – автоматичних контейнерах спеціальної конструкції. Запропоновано концепцію модульної автономії для створюваного дослідницького комплексу «Безекіпажний надводний катер – Корисний вантаж», яка передбачає контейнерне транспортування, зберігання і застосування корисного вантажу. Це дає змогу уніфікувати конструкцію палубного обладнання катера та алгоритмічне забезпечення його системи автоматичного керування. Розроблено основні складові конструкції автоматичного контейнера спеціальної конструкції для палубного транспортування, зберігання і застосування підводних апаратів та розроблено узагальнений алгоритм автоматичного керування таким контейнером. Узагальнений алгоритм передбачає автоматичний випуск підводного апарата для виконання місії та його автоматичне повернення на борт катера. Розроблено основні складові конструкції автоматичного контейнера для палубного транспортування, зберігання і застосування одноразового безекіпажного літального апарата коптерного типу та розроблено узагальнений алгоритм автоматичного керування таким контейнером. Показано особливості реалізації концепції модульної автономії при автоматизації корисного вантажу, які мають враховувати контроль гідрокліматичних умов його застосування та необхідність побудови розвинених підсистеми сенсорів та підсистеми автоматичної діагностики обладнання катера та його корисного надводного катера та його корисного вантажу. Системі автоматичного керування запропоновано будувати як багаторівневу, яка містить рівень діагностики технічного стану обладнання катера та корисного вантажу, рівень розгортання корисного вантажу у робочий стан, рівень забезпечення застосування корисного вантажу за призначенням, рівень згортання корисного вантажу багаторазового використання у початковий стан.

**Ключові слова:** безекіпажний надводний катер, корисний вантаж, дослідження морського середовища, система керування, системний підхід.

The role of unmanned surface boats in the tasks of studying and using the marine environment and its protection from anthropogenic impact is shown. It is established that the list of payloads used from the board of such vessels in the study of the marine environment is expanding every year. This requires further development and improvement of automatic control systems for both unmanned vessels and control of their payload. Based on a systems approach to the tasks performed by unmanned surface boats, a classification of their payload from the standpoint of further automation is proposed and the feasibility of its placement in special electrified platforms – automatic containers of a special design is shown. A concept of modular autonomy is proposed for the research complex being created “Unmanned Surface Boat – Payload”, which provides for container transportation, storage and use of the payload. This makes it possible to unify the design of the boat’s deck equipment and algorithmic support for its automatic control system. The main structural components of an automatic container of a special design for deck transportation, storage and use of underwater vehicles have been developed, and a generalized algorithm for automatic control of such a container has been developed. The generalized algorithm provides for the automatic release of the underwater vehicle for mission performance and its automatic return to the boat. The main structural components of an automatic container for deck transportation, storage and use of a disposable unmanned copter-type aerial vehicle have been developed, and a generalized algorithm for the automatic control of such a container has been developed. The features of the implementation of the concept of modular autonomy in payload automation are shown, which should take into account the control of the hydroclimatic conditions of its use and the need to build advanced sensor subsystems and a subsystem for the automatic diagnostics of the equipment of an

which includes a level of diagnostics of the technical condition of the boat equipment and payload, a level of deployment of the payload into working condition, a level of ensuring the use of the payload for its intended purpose, a level of folding the reusable payload into its original state.

**Keywords:** unmanned surface boat, payload, marine environment research, control system, system approach.

### **Вступ**

Малорозмірні безкіпажні надводні судна – безкіпажні надводні судна набувають все більш широкого застосування при вивченні й використанні морського середовища та його захисті від антропогенного впливу [1]. Очевидно, що основне завдання таких суден у цих морських операціях - бути носієм приладів та інструментів, за допомогою яких, власне, і виконуються дослідження та використання морського середовища в інтересах людства. З позицій проектування такі прилади й інструменти будемо називати корисним вантажем (КВ, в англійській літературі – payload of the vessel, (PV)).

У зв'язку з постійним розширенням морських операцій та підвищенням їх складності перелік типів корисного вантажу, який використовують з борту безкіпажних надводних суден при дослідженні морського середовища, також зростає [2, 3]. Це вимагає подальшого розвитку і вдосконалення систем керування як безкіпажними суднами, так і систем керування їхнім корисним вантажем.

Крім того, особливості виконання морських досліджень у територіальних водах України диктують необхідність створення і застосування малорозмірних суден – безкіпажних надводних катерів (БНК, в англійській літературі – unmanned surface boat, UVB), спроможних виконувати широкий спектр морських дослідницьких місій.

У даному дослідженні будемо розглядати задачі автоматизації керування для двох основних видів КВ для БНК – малогабаритних автономних ненаселених підводних апаратів для дослідження підводного середовища (АНПА, в англійській літературі – Autonomous Underwater Vehicles, AUV) і безпілотних

літальних апаратів коптерного типу (в англійській літературі – unmanned aerial vehicles, UAV) – для дослідження повітряного морського середовища.

**Мета роботи** – аналіз особливостей автоматичного керування корисним вантажем малорозмірного судна – безкіпажного надводного катера як складової завдання його повної автоматизації, а також розробка складу обладнання та узагальнених алгоритмів керування основними видами корисного вантажу такого судна.

### **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій**

Попередні дослідження у напрямку систем керування безкіпажних надводних суден, в основному, стосувалися їх електронної навігації та керування просторовим рухом [4]. Дослідження систем керування їх корисним вантажем на цей час вкрай обмежені [5].

Попередній аналіз публікацій дає змогу констатувати, що питання автоматизації КВ для БНК знаходяться на початковій фазі їх дослідження і розробки.

Так, технічні рішення провідної фірми у галузі підводної техніки «ECA GROUP» [6] являють собою громіздкі рамні конструкції та потребують ручного керування палубною командою науково-дослідного судна.

У роботі [7] наведено детальний огляд літератури щодо сучасних методик наведення стикування АНПА з підводним контейнером, визначаються їх відносні переваги та недоліки. Але повний цикл спуску та підйому контейнера у роботі не розглядається.

У статті [8] обговорюються рішення, які дають змогу АНПА повертатися до підводного контейнера (док-системи), механічно закріпитися, передати дані та отримати підзарядку бортових акумуляторів. Однак задачу автоматичного

спуску і підйому АНПА з контейнером автори не розглядають.

Публікації [9, 10] присвячені розробці системи підводного стикування АНПА, яка поєднує в собі інтелектуальне розпізнавання об'єктів і глибоке навчання на основі принципу глибокого підкріплення (Deep Reinforcement Learning approach). Однак питання повної автоматизації процесу випуску і повернення АНПА на борт судна у статті не розглядається.

Найбільш повне рішення проблеми автоматичного спуску та підйому АНПА міститься у патенті [11], де група підводних апаратів закріплюється у контейнері барабанного типу і послідовно випускається у воду для виконання групової місії. Недоліком такого технічного рішення є відсутність, власне, контейнера як місця тривалого зберігання АНПА з системою клімат-контролю, а також складність повернення АНПА на БНК після виконання місії.

Щодо автоматизації застосування, на цей час основні публікації присвячені розвитку ідеї «Drone-in-a-box» для транспортування і використання безпілотних літальних апаратів – квадрокоптерів, та опису варіантів конструкції транспортних кейсів для них. Значна кількість таких кейсів уже ринково доступна.

Так, у [12-14] пропонуються варіанти транспортних кейсів для дронів у вигляді рюкзака чи ручної валізи. Однак такі кейси призначені тільки для зберігання дронів і не придатні для застосування в автоматичному режимі експлуатації.

Більш перспективним для завдань автоматизації є конструкція «Dronehub» [15], яка являє собою автоматичний контейнер, що забезпечує такі операції, як запуск дрона та його приземлення, процес зарядки акумулятора дрона. Контейнер оснащений клімат-контролем і метеостанцією, тому він може працювати за всіх погодних умов, що робить його ідеальним для використання у польових

умовах. Інтелектуальне керування батареями підтримує оптимальну температуру батарей дрона, значно подовжуючи термін їх служби та продуктивність під час польоту.

Проте конструкція контейнера не герметична, і тому його не можна використовувати у морських умовах.

Ще один варіант конструкції автоматичного контейнера для дрона, призначеного для моніторингу процесів дорожнього руху, наведено у [16]. Конструкція являє собою док-станцію, є міцною, надійною та створеною для цілодобового застосування. Кожна док-станція забезпечує автоматичний зліт дрона, його приземлення та заряджання. Одна док-станція DJI важить менше 105 кг і займає площу менше 1 квадратного метра. Для налаштування потрібна лише фіксація на землі, доступ до живлення, інтернету та швидке налаштування за допомогою пульта дистанційного керування.

Однак конструкція док-станції не передбачає її використання в умовах морської хитавиці та заливання хвилями.

У матеріалі [17] описано конструкцію коробки для дрона, у якій він може автоматично заряджатися, а сама коробка служить платформою для зльоту та посадки дрона. Коробка стійка до вологи, легка і компактна, має пристрій для фіксації дрона після його посадки, не потребує складного технічного обслуговування.

Проте конструкція коробки не герметична і не призначена для експлуатації у морському середовищі.

Аналіз оглядового матеріалу [18-20] показує, що незважаючи на суттєві досягнення у напрямку створення і застосування автоматичних контейнерів для дронів, їх конструкції не призначені для використання у морських умовах.

#### **Формування цілей статті**

Аналіз особливостей виконання морських досліджень у територіальних водах України вказує на необхідність

створення і застосування малорозмірних суден-роботів – безекіпажних надводних катерів, спроможних виконувати широкий спектр морських дослідницьких місій. Такі судна мають бути носіями широкого спектру обладнання для досліджень водного та повітряного середовища морської акваторії.

Повна автоматизація БНК вимагає розробки систем керування його корисним вантажем – підводними і повітряними апаратами-роботами.

Ефективна автоматизація КВ можлива на основі концепції модульної автономії для створюваного роботизованого дослідницького комплексу «БНК – КВ».

При цьому морське транспортування, зберігання і застосування КВ доцільно виконувати з використанням автоматичних контейнерів спеціальної конструкції.

Завдання автоматизації таких контейнерів належить до актуальних завдань повної автоматизації безекіпажних надводних катерів і передбачає розробку конструкції та алгоритмів керування такими об'єктами, що і є головною метою даної статті.

### Висвітлення основного матеріалу статті

Виходячи з принципів системного підходу [21] при аналізі сучасного стану автоматизації традиційних і безекіпажних надводних суден науково-дослідницького призначення, корисний вантаж таких суден пропонується класифікувати у вигляді двох великих груп:

– групи  $G_D$  КВ палубного зберігання і використання (в англійській літературі – deck storage and use);

– групи  $G_C$  КВ контейнерного зберігання і використання (в англійській літературі – container storage and use).

Першу групу утворюють:

– автономні ненаселені підводні апарати,  $G_{D-AUV}$  як носії вимірювальних приладів [22];

– прив'язні самохідні (в англійській літературі – Remotely Operated Vehicles)  $G_{D-ROV}$  підводні апарати як носії

вимірювальних приладів та пробовідбірників води та ґрунту [23];

– прив'язні буксирні (в англійській літературі – Towed Underwater Vehicles)  $G_{D-TUV}$  підводні апарати як носії вимірювальних приладів [24];

– опускні прилади і системи (в англійській літературі – lowering devices and system, LDS)  $G_{D-LDS}$  для вимірювання гідрофізичних та гідрохімічних параметрів водного середовища [25].

Другу групу утворюють:

– безпілотні літаючі апарати  $G_{C-UAV}$  (зазвичай, коптерного типу) [26];

– метеозонди  $G_{C-WB}$  (в англійській літературі – Balloon-borne) (гумові або пластикові кулі, які перед застосуванням автоматично заповнюються воднем або гелієм) [27].

КВ першої групи розміщуються на палубі БНК у спеціальних механізованих ложементів і призначені для вивчення підводного середовища, включаючи і донну поверхню. Такий КВ оснащений сенсорами гідрофізичних і гідрохімічних параметрів морського середовища, підводними фото- і відеокамерами, пробовідбірниками води і ґрунту, гідроакустичними та магнітометричними приладами, підводними маніпуляторами тощо. КВ такої групи, зазвичай, є багаторазовими і такими, що мають повертатись до БНК після завершення підводної місії.

КВ другої групи призначені для вивчення атмосфери над морем, оснащені фото-, відео- та іншою науковою апаратурою і є одноразовим обладнанням, яке не повертається до БНК після виконання місії, або багаторазовим обладнанням, яке повертається до БНК і є придатним для подальшого багаторазового застосування. Вони транспортуються безекіпажним судном до місця призначення у спеціальних контейнерах, які забезпечують їм необхідні кліматичні та механічні умови зберігання та автоматичне застосування за призначенням.

Зазначимо, що на цей час у якості носіїв цих груп КВ застосовуються традиційні науково-дослідні судна значних розмірів, які мають можливість розмістити велику кількість КВ різного призначення [28].

Сучасні задачі дослідження територіальних вод України вимагають масового застосування малорозмірних безекіпажних суден – безекіпажних надводних катерів довжиною від 5 до 20 метрів. Такі катери мають обмежену вантажомісткість і тому можуть одночасно перевозити обмежену кількість змінного КВ. Це обумовлює необхідність уніфікації КВ з позиції їх дистанційного керування та створення БНК, які здатні бути носіями широкого спектру змінного КВ різного призначення.

Одним з можливих шляхів такої уніфікації є перехід до контейнерного зберігання КВ (група  $G_C$ ) та до уніфікації палубного обладнання для роботи з цими контейнерами.

Аналіз науково-технічної літератури свідчить, що на сьогодні створення контейнерів та пускових установок для засобів морської робототехніки розробляється для великих підводних апаратів і тільки за умов наявності людини-оператора. Для БНК це неприйнятно, оскільки такі катери функціонують виключно автоматично.

Тому автори пропонують концепцію модульної автономії для створюваного морського дослідницького комплексу «БНК – КВ» як морського робота, який має у своєму складі змінний КВ широкої номенклатури. Сутність концепції полягає у створенні типорозмірного ряду КВ підводного та повітряного використання, які транспортуються та експлуатуються з борту БНК за допомогою автоматичних контейнерів спеціальної конструкції (АКС). Причому конструкція КВ та процеси керування ним уніфіковані з метою спрощення програмного та апаратного забезпечення і підвищення надійності функціонування обладнання катера та КВ.

Розглянемо склад обладнання АКС та особливості автоматичного керування ним більш детально на прикладах контейнерів для КВ двох типів:  $G_{D-AUV}$  та  $G_{C-UAV}$ .

Для  $G_{D-AUV}$  автоматичний контейнер АКС $_{D-AUV}$ , у якому розміщується затискач з АНПА, розміщується на палубі БНК разом з його вантажним пристроєм маніпуляційного типу (ВПМ). ВПМ призначений для автоматичного вивантаження платформи з затискачем та з АНПА у робочу зону підводного простору БНК перед початком місії, випуску АНПА з платформи з затискачем для виконання підводної місії, приймання АНПА до платформи з затискачем після завершення місії та її повернення на палубу БНК до АКС $_{D-AUV}$  після завершення місії.

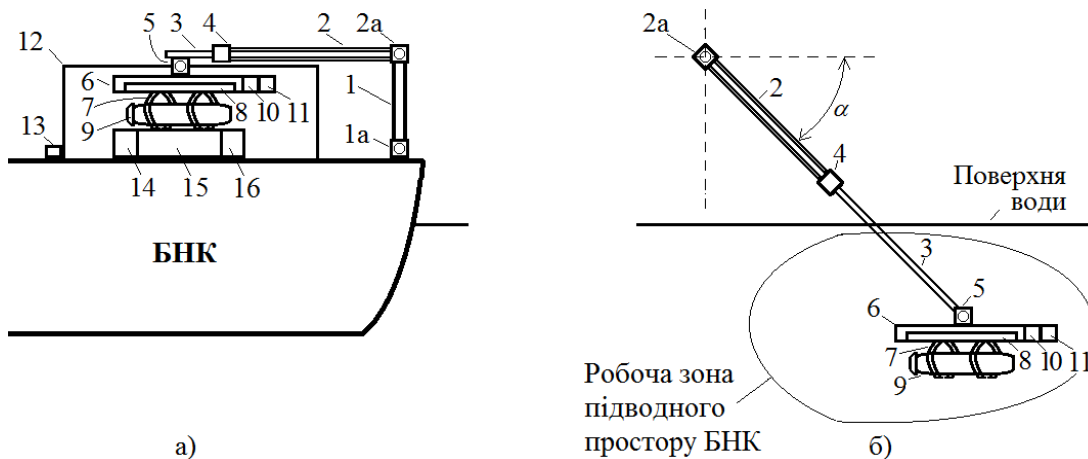
Очевидно, що ступінь захисту АКС $_{D-AUV}$  має бути не нижче *IP56* (пилозахисний, захищений від морських хвиль).

Основні складові комплексу «ВПМ – АКС $_{D-AUV}$ » для  $G_{D-AUV}$  показано на рис. 1, а фаза вивантаження платформи з затискачем та з АНПА у робочу зону підводного простору БНК перед початком місії показана на рис. 1, б.

Конструктивно ВПМ представляє собою дволанковий вантажний механізм, перша ланка 1 якого спирається на поворотну по вертикалі основу з приводом 1а, а друга ланка 2 має телескопічну структуру і з'єднана з ланкою 1 за допомогою шарніра 2а з приводом. Шарнір 2а забезпечує дві керовані ступені рухливості для першої ланки 1 ВПМ – поворот навколо вертикальної осі першої ланки 1 на  $360^\circ$  і нахил вниз на кут  $\alpha$ .

Висувна частина 3 другої ланки 2 має можливість виконувати поздовжній рух за допомогою привода 4.

На кінці висувної частини 3 другої ланки 2 знаходиться шарнір з приводом 5, який прикріплений до платформи 6 з затискачем 7 та його приводом 8, що утримує корпус АНПА 9 при його знаходженні всередині АКС та під час автоматичного переміщення АНПА у робочу зону підводного простору БНК.

Рисунок 1 – Основні складові комплексу «ВПМ – АКС<sub>D-AUV</sub>» для  $G_{D-AUV}$ 

Платформа 6 містить також систему сенсорів її просторового положення під водою 10 та навігаційний маяк 11 (гідроакустичний чи оптичний) для автоматичного приведення АНПА до платформи 6 після виконання підводної місії.

До складу АКС<sub>D-AUV</sub> входять:

- зовнішній корпус 12 з розташованими боковими стулками (на рис. 1 не показані), які автоматично розкриваються за допомогою системи приводів 13 для виконання операції вивантаження на правий чи лівий борт БНК платформи 6 разом з затискачем 7 і АНПА 9 перед початком місії та закриваються після прийому платформи з АНПА всередину АКС<sub>D-AUV</sub> після завершення місії;

- розташовані всередині АКС<sub>D-AUV</sub> система локального керування 14 обладнанням контейнера, затискач з приводом 15 для фіксації положення АНПА «по-похідному», а також система клімат-контролю 16 всередині контейнера.

Узагальнений алгоритм функціонування системи автоматичного керування комплексом «ВПМ – АКС<sub>D-AUV</sub>» для  $G_{D-AUV}$  як складова алгоритму автоматичного керування БНК при виконанні ним місії дослідження морського середовища наведено на рис. 2.

Дамо опис окремих блоків алгоритму у порядку їх нумерації.

Б1 – ініціалізація програми використання комплексу «ВПМ – АКС<sub>D-</sub>

АУВ» для виконання підводної місії; тут у бортовий контролер АНПА завантажується код програми заданої місії, яку має виконати АНПА, а до системи керування ВПМ – програма його роботи, яка враховує вітро-хвильові збурення та положення БНК відносно них.

Б2, Б3 – передстартова автоматична діагностика технічного стану виконавчих механізмів усіх складових комплексу «ВПМ – АКС»; тут на основі вбудованих сенсорів у автоматичному режимі перевіряється технічний стан виконавчих механізмів ВПМ та стан готовності АНПА до виконання місії.

Б4 – розкривання бокових стулок АКС; тут за допомогою системи приводів 12 ліва і права стулки зміщуються спочатку, відповідно, вліво і вправо, вивільняючи шарнір з приводом 5, а потім зміщуються вперед, що забезпечує можливість подальшого кругового руху ланки 2 з платформою 6, затискачем 7 і АНПА 9 над палубою БНК.

Б5 – переведення АНПА з положення «по-похідному» у положення «робоче» у результаті спрацювання затискача з приводом 14.

Б6 – робота шарніра з приводом 2а, що забезпечує поворот ланки 2 ВПМ з платформою 6, затискачем 7 і АНПА 9 навколо вертикальної осі першої ланки 1; у результаті цього руху платформа з АНПА повертається на кут 180° і знаходиться над робочою зоною підводного простору БНК.

Б7, Б8 – одночасна робота шарніра з приводом 2а (нахил ланки 2 вниз на заданий кут  $\alpha$ ) і привода 4 (поздовжній рух висувної частини 3 другої ланки 2); у результаті цих рухів платформа 6 разом з затискачем 7 і АНПА 9 потрапляє у робочу зону підводного простору БНК (рис. 1, б).

Б9, Б10 – одночасна робота привода 8 затискача 7 і механізмів руху АНПА (його рушійного пристрою та/або баластної системи); у результаті роботи цих механізмів затискач вивільняє АНПА для самостійного керованого руху, а АНПА відходить від платформи 6 для початку виконання підводної місії.

Б11, Б12 – одночасна робота шарніра з приводом 2а (підйом ланки 2 до значення кута  $\alpha=0$  і привода 4 (поздовжній рух висувної частини 3 другої ланки 2 у зворотному напрямку); у результаті цих рухів платформа 6 разом з затискачем 7 знаходиться над робочою зоною підводного простору БНК, причому висувна частина 3 другої ланки 2 знаходиться у початковому положенні.

Б13 – робота шарніра з приводом 2а, що забезпечує поворот ланки 2 ВПМ з платформою 6 і затискачем 7 навколо вертикальної осі першої ланки 1у положення над АКС.

Б14 – закривання стулоч АКС, для чого система приводів 12 зміщує ліву і праву ступки назад, а далі, відповідно, вліво і вправо, ущільнюючи шарнір з приводом 5, що забезпечує для АКС<sub>D-AUV</sub> ступінь захисту IP56.

Б15 – автоматична діагностика технічного стану виконавчих механізмів усіх складових комплексу «ВПМ – АКС» (крім АНПА).

Очевидно, що в основному алгоритм повернення АНПА на борт БНК буде схожим з вищеописаним алгоритмом. Особливістю цієї частини узагальненого алгоритму є приведення АНПА до платформи 6 за допомогою навігаційного маяка. При цьому платформа 6 має знаходитись у робочій зоні підводного простору в результаті виконання блоків Б1 – Б8.

Опишемо цю частину узагальненого алгоритму більш конкретно, вважаючи, що затискач 7 знаходиться у відкритому стані та готовий до прийому АНПА.

Блоки алгоритму повернення АНПА на борт БНК, які будуть відрізнятись від однойменних на рис. 2, будемо позначати літерою «Ф».

БФ9 – включення навігаційного маяка як маркера знаходження платформи 6 для системи наведення АНПА.

БФ10 – автоматичний підхід АНПА у зону роботи затискача 7 платформи 6 та спрацювання затискача 7 на фіксацію АНПА на платформі 6.

БФ15 – автоматична діагностика технічного стану виконавчих механізмів усіх складових комплексу «ВПМ – АКС».

Описаний узагальнений алгоритм може бути основою для синтезу системи автоматичного керування процесом використання АНПА згідно з концепцією модульної автономії дослідницького БНК.

Очевидно, що для кожної складової групи  $G_D$  КВ палубного зберігання і використання має бути розроблено окремий тип АКС, який має враховувати особливості конструкції та використання відповідного КВ цієї групи.

Розглянемо тепер склад обладнання та особливості автоматичного керування АКС для  $G_{C-UAV}$ . Такий контейнер також знаходиться на палубі БНК, але не потребує додаткового палубного обладнання при експлуатації.

Зазначимо, що у науково-технічній літературі наводяться відомості лише про контейнери для UAV, які передбачають тільки ручні операції та сухопутне використання [18-20].

Тому, виходячи з пропонованої концепції модульної автономії та враховуючи розробки наукової школи «Підводна техніка» Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, автори пропонують новий підхід до розробки і створення АКС  $G_{C-UAV}$ , який передбачає повну автоматизацію процесів транспортування,

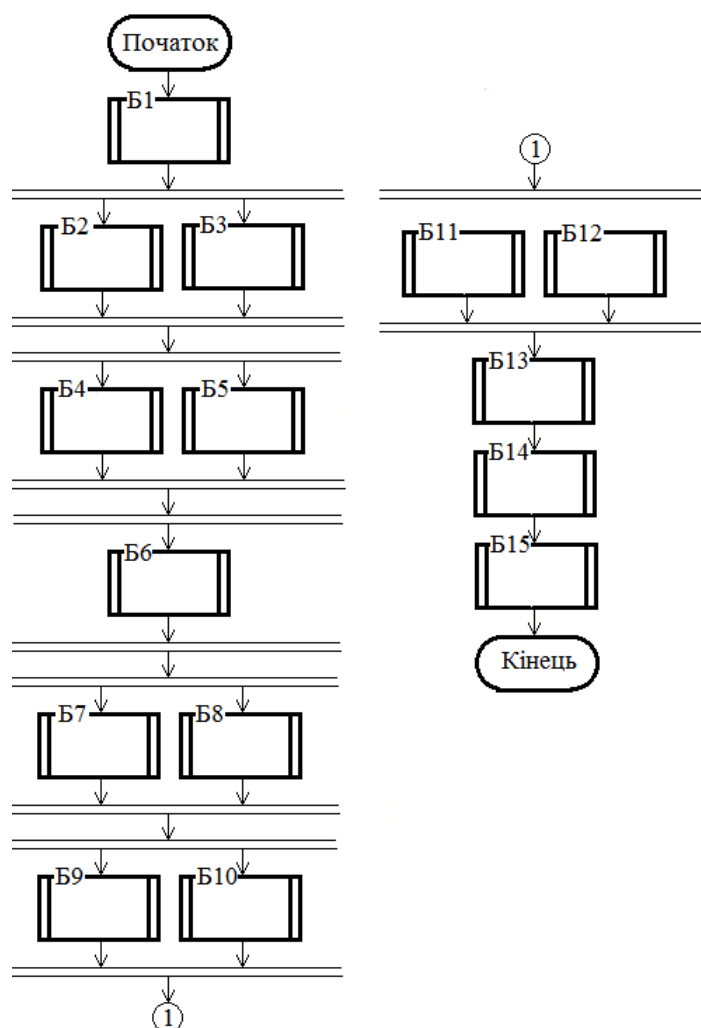


Рисунок 2 – Узагальнений алгоритм керування процесом випуску АНПА для виконання місії дослідження морського середовища

зберігання і застосування КВ типу одноразового UAV типу «коптер».

Конструктивно до складу такого АКС  $G_{C-UAV}$  входять (див. рис. 3):

зовнішній герметичний корпус 1 АКС з розташованою у його верхній частині кришкою 2, яка автоматично відкривається для випуску коптера з АКС;

розташовані у корпусі АКС виконавчий механізм 3 відкривання/закривання кришки АКС, механізм 4 висування ложементу 5 з коптером 6 та його фіксатором у положенні «по-похідному» 7, система 8 клімат-контролю для коптера, система 9 автоматичного керування коптером, система 10 живлення коптера, система 11 автоматичної діагностики коптера і технічного стану виконавчих механізмів і систем АКС.

Узагальнений алгоритм керування процесом випуску коптера для дослідження атмосфери над морем має наступні блоки:

Б1 – ініціалізація програми використання комплексу «ВІМ – АКС  $G_{C-UAV}$ » для виконання надводної місії; тут у бортовий контролер коптера завантажується код програми заданої місії, яку він має виконати, а до системи керування ВІМ – програма його роботи, яка враховує вітро-хвильові збурення та положення БНК відносно них.

Б2, Б3 – передстартова автоматична діагностика технічного стану виконавчих механізмів усіх складових комплексу «ВІМ – АКС  $G_{C-UAV}$ »; тут на основі вбудованих сенсорів у автоматичному режимі перевіряється технічний стан

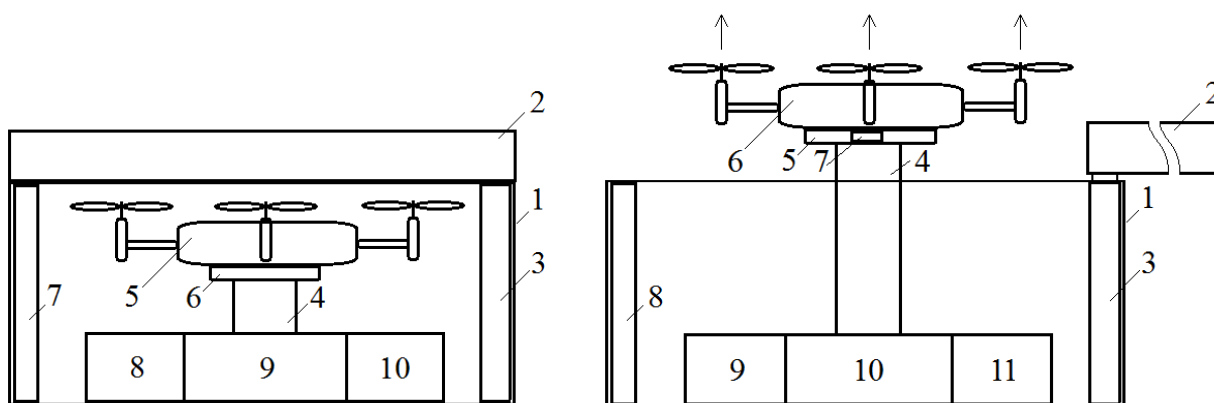


Рисунок 3 – Основні складові АКС  $G_{C-UAV}$ :  
а – АКС у режимі «по-похідному»; б – АКС у режимі випуску коптера

виконавчих механізмів ВПМ та стан готовності коптера до виконання місії.

Б4 – розкриття кришки 2 АКС; тут за допомогою виконавчого механізму 3 кришка 2 АКС спочатку піднімається на деяку висоту над корпусом 1, у результаті чого відбувається розгерметизація АКС, а потім розвертається на  $180^\circ$  відносно вертикальної осі виконавчого механізму 3, у результаті чого звільняється вертикальний простір над АКС для безперешкодного злету коптера.

Б5 – висунання ложементу 5 з коптером 6 та його фіксатором 7 у верхнє (над корпусом 1) положення за допомогою механізму 4 (див. рис. 3, б).

Б6 – переведення коптера з положення «по-похідному» у положення «робоче» у результаті спрацювання фіксатора 7.

Б7 – зліт коптера.

Б8 – переведення ложементу 5 з фіксатором 7 у нижнє (початкове) положення за допомогою механізму 4.

Б9 – закриття кришки 2 АКС; тут за допомогою виконавчого механізму 3 кришка 2 АКС спочатку розвертається на  $180^\circ$  відносно вертикальної осі виконавчого механізму 3, у результаті чого вона займає положення «над корпусом 1», а потім опускається вниз і, таким чином, герметично закриває корпус АКС.

Б10 – автоматична діагностика технічного стану виконавчих механізмів усіх складових АКС  $G_{C-UAV}$  (крім коптера).

Таким чином, узагальнюючи наведені варіанти автоматичного керування комплексом «ВПМ – АКС $_{D-AUV}$ » та АКС  $G_{C-UAV}$ , відзначимо, що концепція модульної автономії вимагає при синтезі систем керування БНК та його КВ урахування наступних особливостей:

- контроль гідрокліматичних умов застосування КВ – вітрових збурень, хвилювання морської поверхні тощо;

- необхідність побудови розвинених підсистем автоматичної діагностики всього обладнання БНК та його палубного устаткування;

- необхідність узгодженого керування просторовим положенням і динамікою БНК та його палубним устаткуванням і КВ відповідного типу.

Таку систему керування пропонується будувати як багаторівневу, яка включає наступні рівні:

- рівень діагностики технічного стану БНК, палубного обладнання та КВ;

- рівень розгортання корисного вантажу у робочий стан;

- рівень забезпечення застосування корисного вантажу за призначенням;

- рівень згортання корисного вантажу багаторазового використання у початковий стан.

Важливою складовою синтезу систем керування комплексом «БНК – КВ» є обґрунтований вибір системи сенсорів, які генерують інформацію про технічний стан

та про поточне положення всіх виконавчих механізмів такого комплексу як об'єкт керування.

Таким чином, запропоновані два варіанти АКС та узагальнені алгоритми керування ними свідчать про можливість і доцільність практичної реалізації концепції модульної автономії комплексу «БНК – КВ» для широкого спектру задач роботизованого дослідження морського середовища.

### Висновки

1. Показана можливість застосування безкіпажних надводних катерів, оснащених широким переліком корисного вантажу дослідницького призначення, для вивчення морського підводного та повітряного середовищ.

2. На основі системного підходу до завдань, що виконують безкіпажні надводні судна, запропоновано класифікацію їх корисного вантажу та показана доцільність його розміщення у спеціальних електрифікованих платформах – автоматичних контейнерах спеціальної конструкції.

3. Запропоновано концепцію модульної автономії для створюваного дослідницького комплексу «Безкіпажний надводний катер – Корисний вантаж», яка передбачає контейнерне транспортування, зберігання і застосування корисного вантажу і дає змогу уніфікувати конструкцію палубного обладнання катера та алгоритмічне забезпечення його системи автоматичного керування.

4. Розроблено основні складові конструкцій автоматичних контейнерів спеціальної конструкції для палубного транспортування, зберігання і застосування підводних і повітряних апаратів-роботів та розроблено узагальнені алгоритми керування ними як теоретичну основу ефективного використання таких засобів морської робототехніки для дослідження морського середовища.

5. Успішний розв'язок прикладної наукової задачі автоматичного керування комплексом «Безкіпажний надводний

катер – Корисний вантаж» дасть змогу оснастити державні морські дослідницькі організації сучасними засобами морської робототехніки, що забезпечить виконання державних та галузевих програм вивчення та освоєння морського середовища.

### Список використаних джерел / References

1. Zhixiang Liu, Youmin Zhang, Xiang Yu, Chi Yuan. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*. 2016. Vol. 41. P. 71-93. DOI: [10.1016/j.arcontrol.2016.04.018](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018)
2. Seagoing Tools of Oceanography. U.S. National Science Foundation. URL: <https://www.nsf.gov/geo/oce/whatis/tools.jsp>
3. Exploration Tools. National Oceanic and Atmospheric Administration. URL: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/technology.html>
4. Baldauf M., Kitada M., Raza Ali Mehdi, Dalaklis Dimitrios. E-Navigation, Digitalization and Unmanned Ships: Challenges for Future Maritime. *Education and Training*. Proceedings of INTED2018 Conference 5th-7th March 2018, Valencia, Spain. Conference Paper, March 2018. P.9525-9530. DOI: [10.21125/inted.2018.2374](https://doi.org/10.21125/inted.2018.2374)
5. Manuel A., Ramos R., Olivar G. and oth. Automatic measurement in the oceanographic vessel Hesperides. Conference: Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE. Vol. 1. DOI: [10.1109/IMTC.2001.928841](https://doi.org/10.1109/IMTC.2001.928841)
6. A18D / AUV / Autonomous Underwater Vehicle. URL: [https://www.ecagroup.com/en/solutions/a18-d-auv-autonomous-underwater-vehicle?gad\\_source=1&gclid=EA1aIQobChMIiZyM4MWcigMVTVWRBR0iYT2HEAAYASAAEgJqWPD\\_BwE](https://www.ecagroup.com/en/solutions/a18-d-auv-autonomous-underwater-vehicle?gad_source=1&gclid=EA1aIQobChMIiZyM4MWcigMVTVWRBR0iYT2HEAAYASAAEgJqWPD_BwE)
7. Yazdani A.M., Sammut K., Yakimenko O., Lammas A.. A survey of underwater docking guidance systems. *Robotics and Autonomous Systems*. 2020. Vol. 124. DOI: [10.1016/j.robot.2019.103382](https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103382)

8. R. Stokey et al. A docking system for REMUS, an autonomous underwater vehicle. *Oceans '97. MTS/IEEE Conference Proceedings*, Halifax, NS, Canada, 1997. Vol. 2. P. 1132-1136. DOI: [10.1109/OCEANS.1997.624151](https://doi.org/10.1109/OCEANS.1997.624151)
9. Palomeras N., Ridao P. Autonomous Underwater Vehicle Docking Under Realistic Assumptions Using Deep Reinforcement Learning. *Drones*. 2024. Vol. 8(11). P. 673. DOI: [10.3390/drones8110673](https://doi.org/10.3390/drones8110673)
10. Chao-Ming Yu, Yu-Hsien Lin. The docking control system of an autonomous underwater vehicle combining intelligent object recognition and deep reinforcement learning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Volume 139, Part A, January 2025. 109565. DOI: [10.1016/j.engappai.2024.109565](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109565)
11. Autonomous underwater vehicle (AUV) deployment device. Patent China CN102826210B. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/77/59/1f/2dc2d44468213f/CN102826210B.pdf>
12. Case DJI Avata. URL: [https://for-extreme.com.ua/ua/accesories/bags\\_cases/startrc-1118711-plastikovij-kejs-dji-avata?gc\\_lid=EAIaIQobChMI0K2SsPYigMVPxSiAx2FtAP\\_EAQYCCABEGIM3vD\\_BwE&keyword=&utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc](https://for-extreme.com.ua/ua/accesories/bags_cases/startrc-1118711-plastikovij-kejs-dji-avata?gc_lid=EAIaIQobChMI0K2SsPYigMVPxSiAx2FtAP_EAQYCCABEGIM3vD_BwE&keyword=&utm_source=google&utm_medium=cpc) [in Ukrainian]
13. Waterproof rack for DJI Mavic 2 Pro / Mavic 2 Pro. URL: [https://aliexpress.ru/item/1005005949758705.html?sku\\_id=12000034989013274&spm=a2g2w.productlist.search\\_results.17.5cc93f68i9Y6yl](https://aliexpress.ru/item/1005005949758705.html?sku_id=12000034989013274&spm=a2g2w.productlist.search_results.17.5cc93f68i9Y6yl)
14. Водонепроникний протиударний рюкзак для портативної сумки для зберігання дрона DJI Neo. URL: [https://aliexpress.ru/item/1005007727831100.html?spm=a2g2w.productlist.rcmdprod.4.5cc93f68i9Y6yl&sku\\_id=12000042006655170](https://aliexpress.ru/item/1005007727831100.html?spm=a2g2w.productlist.rcmdprod.4.5cc93f68i9Y6yl&sku_id=12000042006655170)
15. Dronehub is the autonomous game-changer for inspection and monitoring. URL: <https://dronehub.ai/>
16. DJI Docks. For Roads Less Traveled. URL: <https://enterprise.dji.com/dock>
17. Drone in a box with lightweight and maintenance-free motion plastics. URL: <https://www.igus.com.ua/info/drone-in-a-box>
18. Best Drone Docks in 2024. URL: <https://www.flytbase.com/blog/dji-compatible-docking-stations>
19. Drone Docking System. Updated: November 22, 2024. URL: <https://xray.greyb.com/drones/docking-system-for-drones>
20. Grlj C.G., Pranjić M. A Decade of UAV Docking Stations: A Brief Overview of Mobile and Fixed Landing Platforms. *Drones*. 2022. Vol. 6(1). P. 17. DOI: [10.3390/drones6010017](https://doi.org/10.3390/drones6010017)
21. Blintsov V.S., Klochkov O.P. Generalized method of designing unmanned remotely operated complexes based on the system approach. *Scientific journal «EUREKA: Physics and Engineering»*. 2019. Vol. 2 (21). P. 43-51. DOI: [10.21303/2461-4262.2019.00878](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00878)
22. Fabiana Di Ciaccio, Salvatore Troisi. Monitoring marine environments with Autonomous Underwater Vehicles: A bibliometric analysis. *Results in Engineering*. 2021. Vol. 9. 100205. DOI: [10.1016/j.rineng.2021.100205](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100205)
23. How Subsea Remotely Operated Vehicles (ROVs) Work For Ocean Research. – SubCImaging. URL: <https://www.subcimaging.com/case-studies/how-subsea-remotely-operated-vehicles-rovs-work-for-ocean-research>
24. Blintsov O., Sokolov V., Korytskyi V. Synthesis of precise automatic control system of a second order object in uncertainty conditions. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. Vol. 14, Issue 6. P. 1218–1228. URL: [http://www.arpnjournals.org/jeas/research\\_papers/rp\\_2019/jeas\\_0319\\_7671.pdf](http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2019/jeas_0319_7671.pdf)
25. Jacopo Aguzzi, Laurenz Thomsen, Sascha Flögel and others. New Technologies for Monitoring and Upscaling Marine Ecosystem Restoration in Deep-Sea Environments. *Engineering*. 2024. Vol. 34. P. 195-211. DOI: [10.1016/j.eng.2023.10.012](https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.10.012)

26. Miguel Álvarez-González, Paula Suarez-Bregua, Graham J. Pierce and Camilo Saavedra. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Marine Mammal Research: A Review of Current Applications and Challenges . *Drones* 2023. Vol. 7(11). 667. DOI: [10.3390/drones7110667](https://doi.org/10.3390/drones7110667)

27. Balloon-borne surveys of the atmosphere. King Abdullah University of Science and Technology. 2015. URL: <https://www.kaust.edu.sa/en/news/balloon-borne-surveys-of-the-atmosphere>

28. Research vessel. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Research\\_vessel](https://en.wikipedia.org/wiki/Research_vessel)

**AUTOMATION OF PAYLOAD CONTROL  
OF AN UNCREWED SURFACE BOAT  
FOR RESEARCH OF THE MARINE  
ENVIRONMENT**

V. A. Nadtochii, A. P. Burunin

Admiral Makarov National University of Shipbuilding,  
9 Heroes of Ukraine Avenue, Mykolaiv, 54007,  
Ukraine;  
e-mail: [nva074@gmail.com](mailto:nva074@gmail.com)

УДК 681.5:624.7

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-81-93

## СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ МУФЕЛЬНОЇ ПЕЧІ

*М. І. Горбійчук, А. М. Лазорів, М. І. Козуляк*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна; e-mail: gorb@nung.edu.ua*

Муфельні печі з двома незалежними джерелами живлення використовують для закалювання невеликих за розміром деталей. Для дослідження ступеня взаємовпливу між входами і виходами об'єкта використано матрицю Брістоля та комплексний коефіцієнт зв'язності. Отримані результати показали, що існують суттєві перехресні зв'язки між вхідними та вихідними величинами муфельної печі. Тому синтез систем автоматичного керування температурним режимом муфельної течі здійснено з врахуванням наявності перехресних зв'язків. Розроблено три варіанти систем керування температурним режимом муфельної печі. Перший варіант – багатоканальна одноконтурна САК за температурою в контрольних точках; другий варіант – багатоканальна гібридна одноконтурна САК за температурою в нижній контрольній точці та слідкуюча система за різницею температур в контрольних точках заготовки та третій варіант – автономна САК із розв'язанням перехресних каналів за допомогою зовнішнього коректора, який «ліквідує» вплив перехресних каналів і забезпечує автономне налаштування регуляторів. Проведений порівняльний аналіз розроблених САК методом імітаційного моделювання дав змогу встановити, що показники якості роботи синтезованих САК відповідають заявленим технічним вимогам як при стрибкоподібній, так і при програмній у часі зміні завдання.

**Ключові слова:** муфельна піч, перехресні зв'язки, системи керування, імітаційне керування, показники якості.

Muffle furnaces with two independent power sources are used for hardening small parts. To study the degree of mutual influence between the inputs and outputs of the object, the Bristol matrix and the complex coefficient of connectivity were used. The obtained results showed that there are significant cross-connections between the input and output values of the muffle furnace. Therefore, the synthesis of systems for automatic control of the temperature regime of the muffle flow was carried out taking into account the presence of cross connections. Three variants of muffle furnace temperature control systems have been developed. The first option is a multi-channel single-circuit SAC based on temperature at control points; the second option is a multi-channel hybrid single-circuit SAC based on the temperature at the lower control point and a tracking system based on the temperature difference in the control points of the workpiece, and the third option is an autonomous SAC with resolution of cross channels using an external corrector, which "eliminates" the influence of cross channels and provides autonomous adjusting the controls. The conducted comparative analysis of developed SACs by the method of simulation modeling made it possible to establish that the indicators of the quality of work of synthesized SACs meet the stated technical requirements both with a jump-like and with a program change in time of the task.

**Keywords.** muffle furnace, cross connections, control systems, simulation control, quality indicators.

### Вступ

Муфельні печі – невеликі за розміром теплові об'єкти, які використовують як для проведення лабораторних досліджень, так і в промисловості для виготовлення невеликих за розміром деталей. Муфельна піч є апаратом періодичної дії. Технологічний режим муфельної печі включає в себе три фази: нагрівання печі до заданої температури (перша фаза), підтримання температури на заданому

рівні (робоча фаза) і охолодження печі (третя, завершальна фаза).

Муфельні печі живляться від електричного джерела енергії, до якого підключені нагрівальні елементи (тени), виготовлені з матеріалів з великим омичним опором.

У переважній більшості випадків муфельні печі мають одне джерело живлення, за допомогою якого здійснюється нагрівання електричних

елементів опору, і які створюють температурний режим у муфельній печі. У таких печах для стабілізації температури використовують одноканальні регулятори, які мають у своєму складі датчик температури, мікропроцесорний пристрій (контролер) і тиристорний виконавчий механізм. За допомогою останнього до нагрівача підводиться необхідна потужність.

У даній роботі розглядається тип муфельних печей, які мають два окремих джерела живлення, що зумовлює наявність двох каналів передачі керуючих впливів та породжує додаткові зв'язки, погіршуючи якість керування такими об'єктами.

За допомогою матриці Брістоля встановлено, що перехресні канали є рівносильними, і з урахуванням встановленого факту синтезовано три варіанти автоматичних систем керування температурним режимом муфельної печі, які показали хороші показники якості роботи як при стрибкоподібній, так і при поступовій зміні завдання.

#### **Аналіз літературних джерел**

Успішний синтез системи автоматичного керування технологічними процесами, зокрема тепловими, можливий за умови, якщо створено адекватну технологічному процесу математичну модель. Технологічні апарати, в яких протікають теплові процеси, є об'єктами з розподіленими параметрами [1]. Створення математичних моделей таких об'єктів можливе лише при певній ідеалізації об'єкта керування. Але, навіть за такої умови, математичні моделі є досить складними і малоприсадогими для вирішення задачі синтезу систем автоматичного керування. Так, наприклад, запропонована авторами [2] математична модель складається із шести диференціальних рівнянь у часткових похідних, які вміщують цілий ряд емпіричних коефіцієнтів, визначення яких вимагає значного обсягу експериментальних досліджень. Для спрощення математичного моделювання

муфельної печі без помітної втрати точності автор роботи [3] умовно розбив піч на 14 зон. Кожна з цих зон розглядається як деякий об'єкт із зосередженими параметрами. Такі моделі є малоприсадогими для цілей синтезу систем автоматичного керування через свою складність, які важко подати в термінах «вхід-вихід». Альтернативою аналітичного підходу є створення [4] емпіричних моделей муфельної печі з двома незалежними джерелами живлення на базі спланованого експериментального дослідження.

Сучасні системи автоматичного керування температурним режимом у муфельній печі будують на основі контролера, який реалізує ПІ- або ПІД-алгоритми керування [5]. Для запобігання перегріву печі при виході на робочий режим сучасні системи автоматичного керування температурою в муфельній печі мають у контурі керування елемент, який виконує функції відсікання струму [6].

Останнім часом увагу дослідників привертають нові методи синтезу систем керування температурними режимами в муфельних печах, засновані на ідеях штучного інтелекту. Так, у роботі [7] синтезована система автоматичного керування температурним режимом у муфельній печі з Fuzzy-регулятором та досліджені її властивості в середовищі MatLab/Simulink.

На теперішній час нечітке регулювання знаходиться на стадії теоретичних розробок, і поки що не знайшло широкого застосування для автоматичного керування технологічними процесами, зокрема тепловими. Зазвичай для автоматичного керування тепловими процесами застосовують класичні ПІ- та ПІД-алгоритми керування, що пояснюється високими їх експлуатаційними якостями.

У тому випадку, коли муфельна піч оснащена двома незалежними джерелами живлення, потрібні додаткові дослідження зі створення систем автоматичного керування з урахуванням наявності

перехресних зв'язків між виходами муфельної печі.

**Метою роботи** – є синтез систем автоматичного керування на основі створеної емпіричної моделі муфельної печі з двома незалежними джерелами живлення із врахуванням наявних перехресних зв'язків, а також якісна та кількісна оцінка ефективності їх функціонування.

Поставленої мети досягнуто шляхом розв'язання таких задач:

– розроблення основних структур систем автоматичного керування температурним режимом муфельної печі з двома незалежними джерелами живлення;

– створення імітаційної моделі розроблених структур систем автоматичного керування температурним режимом муфельної печі та проведення порівняльного аналізу ефективності їх функціонування;

– розроблення практичних аспектів реалізації системи автоматичного керування температурним режимом муфельної печі на базі мікропроцесорної техніки, інтегрованої в систему SCADA.

#### **Виклад основного матеріалу**

Муфельна піч з двома незалежними джерелами електричної енергії є об'єктом керування з двома входами і двома виходами, між якими існують перехресні зв'язки. Температурний режим у печі характеризується температурами в двох точках  $T_v$  і  $T_n$  (див. рис. 2), які повинні підтримуватись з високою точністю для отримання високоякісних заготовок.

Вимоги до синтезованої системи автоматичного керування температурним режимом муфельної печі визначаються технологічним регламентом, а саме:

Час нагрівання:

– до температури 300 °C не більше 1 год;

– до температури 600 °C не більше 1,5 год;

– до температури 800 °C не більше 2,5 год;

Величина перерегулювання не повинна перевищувати при нагріванні:

– до 400 °C - не більше 2 °C;

– до 600 °C – не більше 3 °C;

– від 600 °C до 800 °C – не більше 4 °C.

Розбіжність температури в контрольних точках та між профілем SP при виході на задану точку – не вища  $\pm 2$  °C.

Розбіжність між температурами в контрольних точках – не вища за 1 °C.

Регламентом передбачено достатньо жорсткі вимоги до спроектованих систем як за точністю підтримування температури, так і за часом виходу на температурний режим загартування. Тому необхідно провести детальні дослідження синтезованих АСР та оцінити ефективність кожної з них.

У роботі [4] отримано емпіричні моделі муфельної печі за кожним із чотирьох каналів передачі впливів від входу на її вихід (при зміні потужності по кожному входу  $\Delta u = 40\%$ ). Параметри емпіричних моделей муфельної печі як об'єкта керування відображено у табл. 1.

Міру взаємозв'язку між входами та виходами об'єкта керування в статичному стані можна оцінити за допомогою матриці Брістоля [8]:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \cdots & \lambda_{ij} & \cdots \\ \lambda_{m1} & \cdots & \lambda_{mn} \end{bmatrix}.$$

Елементи матриці  $\Lambda$  визначаються за формулою:

$$\lambda_{ij} = [W_u(0)]_{ij} \cdot [W_u(0)^T]_{ij}^{-1},$$

де  $W_u(0) = \lim_{s \rightarrow 0} W_u(s)$ .

Матрична передавальна функція об'єкта керування має вигляд [9]:

$$W_u(s) = \begin{bmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) \end{bmatrix}.$$

З врахуванням параметрів передавальних функцій  $W_{ij}(s)$  (табл. 1) отримаємо

Таблиця 1 – Параметри емпіричних моделей по каналах управління ( $\Delta u = 40$ )

Передавальні функції	$k$	$k^* = k/\Delta u$	Параметри чисельника ПФ			Параметри знаменника ПФ			
			$b_0$	$b_1$	$b_2$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
$W_{11}(s)$	468.25	11.71	7828.23	97.77	1	559116.88	16854.16	206.53	1
$W_{12}(s)$	459.25	11.48	7724.32	97.20	1	612374.61	17821.93	211.50	1
$W_{21}(s)$	150,00	3.75	10401.34	136.80	1	1596016.46	34051.10	290.59	1
$W_{22}(s)$	172.88	4.322	9560.48	111.38	1	1133264.06	26531.02	254.91	1

$$W_u(0) = \begin{bmatrix} 11.71 & 11.48 \\ 3.75 & 4.322 \end{bmatrix}$$

і відповідно

$$\left[ W_u(0)^T \right]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.5716 & -0.496 \\ -1.518 & 1.5488 \end{bmatrix}.$$

Тоді матриця Брістоля буде такою:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 6.694 & -5.694 \\ -5.694 & 6.694 \end{bmatrix}.$$

Як бачимо, матриця Брістоля є симетричною з рівними діагональними елементами, які відмінні від одиниці, а недиагональні елементи не нульові. Отже, між каналами керування існують значні перехресні зв'язки, що необхідно врахувати при синтезі системи автоматичного керування.

В динамічному режимі для якісної оцінки взаємовпливу контурів керування використовується комплексний коефіцієнт зв'язаності  $K_{36}(j\omega)$  [10]:

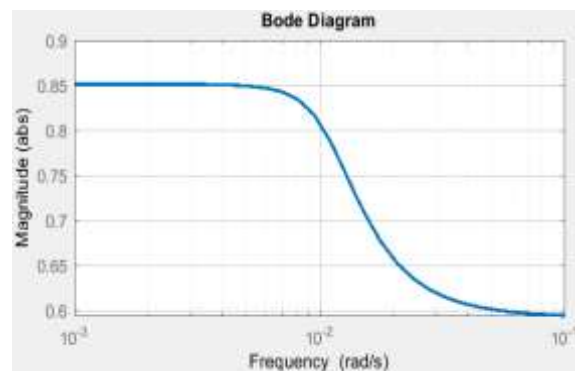
$$K_{36}(j\omega) = \frac{W_{12}(j\omega) \cdot W_{21}(j\omega)}{W_{22}(j\omega) \cdot W_{11}(j\omega)},$$

який обчислюють при  $\omega = 0$ , а також в робочому діапазоні частот.

В нашому випадку

$$K_{36}(s) = \frac{1.124 \cdot 10^{-6} s^6 + 1.479 \cdot 10^{-9} s^5 + 7.107 \cdot 10^{-13} s^4 + 1.598 \cdot 10^{-16} s^3 + 1.781 \cdot 10^{-20} s^2 + 1.297 \cdot 10^{-12} s^4 + 2.532 \cdot 10^{-16} s^3 + 2.542 \cdot 10^{-20} s^2 + 9.383 \cdot 10^{-25} s + 1.847 \cdot 10^{-29}}{1.239 \cdot 10^{-24} s + 2.285 \cdot 10^{-29}}. \quad (1)$$

Амплітудно-частотну характеристику  $K_{36}(j\omega)$  наведено на рис. 1.

Рисунок 1 – Характеристика коефіцієнта зв'язності  $|K_{36}(j\omega)|$ 

Оскільки коефіцієнт зв'язності у всьому діапазоні частот знаходиться в середині діапазону  $[0 \dots 1]$  рад/с, то основні та перехресні канали є рівносильними, і необхідно синтезувати АСК з врахуванням перехресних зв'язків, що також підтверджено аналізом матриці Брістоля.

Тому принципово можна синтезувати системи автоматичного керування (САК) за трьома варіантами:

1) Багатоканальна одноконтурна САК за температурою в контрольних точках (рис. 2).

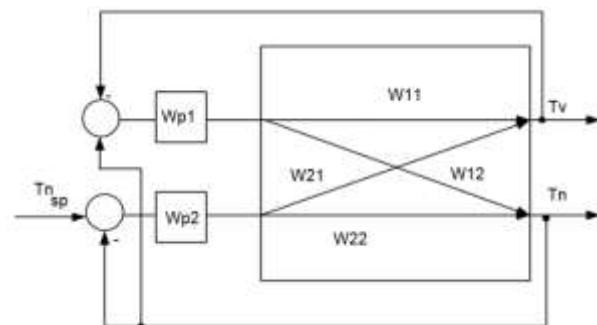


Рисунок 2 – Багатоканальна АСК за температурами в контрольних точках

При налаштуванні регуляторів необхідно враховувати вплив перехресних зв'язків.

2) Багатоканальна гібридна одноконтурна САК за температурою в нижній контрольній точці та відстежувальна система за різницею температур в контрольних точках заготовки (рис. 3).

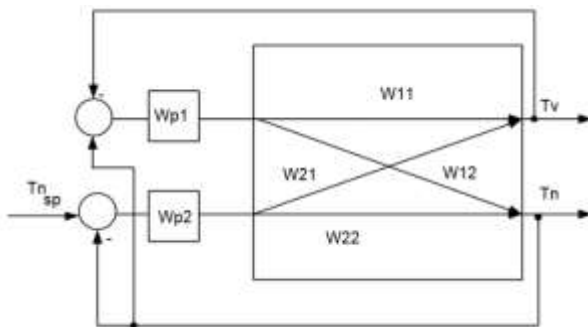


Рисунок 3 – Багатоканальна АСР за температурою та різницею температур в контрольних точках заготовки

Така структура характерна для даного об'єкта, оскільки температури в контрольних точках необхідно підтримувати на одному рівні з меншою розбіжністю при нагріванні за заданим профілем. Таким чином, регулятор  $Wp2$  забезпечує формування необхідного температурного профілю, а  $Wp1$  – балансує температури в контрольних точках.

3) Автономна САК з розв'язанням перехресних каналів за допомогою зовнішнього коректора [9, 11] (рис. 4).

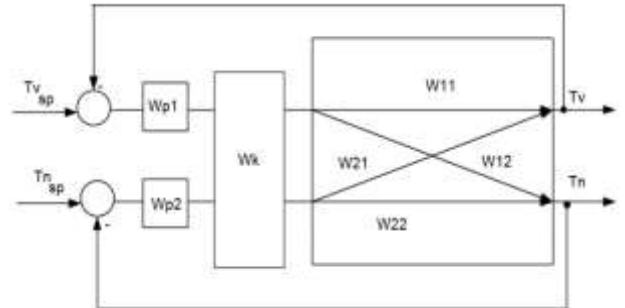


Рисунок 4 – Автономна АСР з коректором перехресних зв'язків об'єкта

Дана структура системи має коректор, який «ліквідує» вплив перехресних каналів і забезпечує автономне налаштування регуляторів.

Імітаційні моделі досліджуваних САК мають однакові базові елементи, які розглянемо на прикладі третього варіанту (рис. 5). Модель має у своєму складі *Sub*блок «Муфельна піч», в основі якого лежать отримані в [4] моделі об'єкта керування за відповідними каналами, два регулятори [12], вузли завдань, елементи контролю точності та візуалізації дослідження.

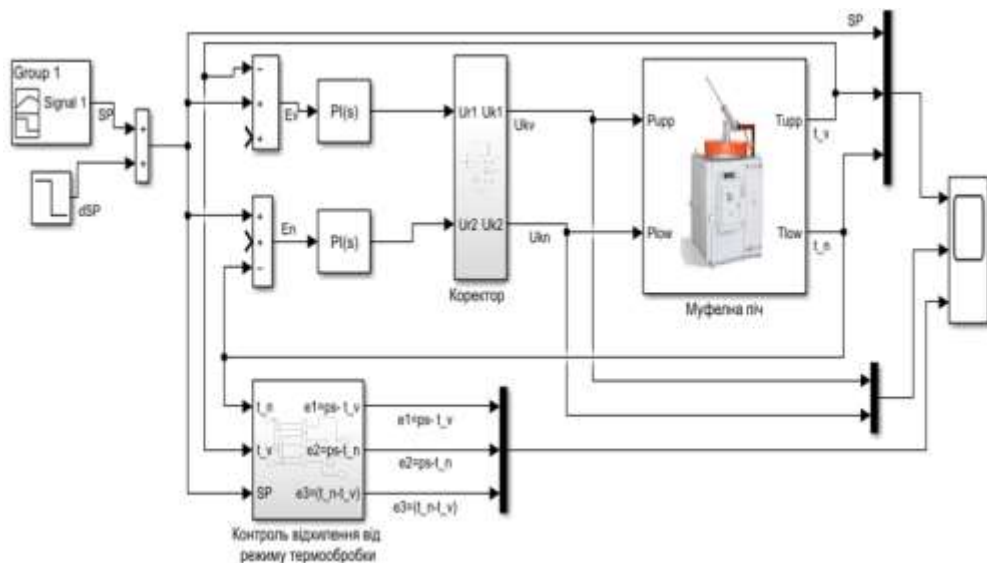


Рисунок 5 – Імітаційна модель досліджуваної АСК з компенсатором перехресних зв'язків

Завдання регуляторам формується за певним температурним профілем (рис. 6). Для аналізу відпрацювання САК при зміні завдання  $SP(t)$  температурний профіль задавався з мінімальною швидкістю зміни ( $V_{sp}^{min} = 5.33 \text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$ ). Мінімальна швидкість близька до обмеження, яке визначене регламентом.

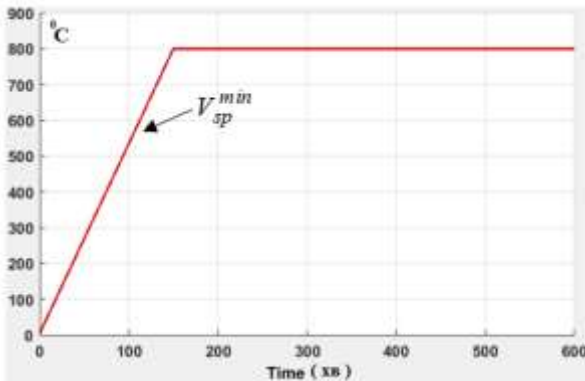


Рисунок 6 – Формування робочого профілю нагрівання заготовки для проведення досліджень

Оцінювались якісні показники роботи систем керування при стрибкоподібній зміні завдання, яке формувалось блоком *Step* (сигнал  $dSP$ ) із зсувом в часі (рис. 6). Точка прикладання стрибкоподібного збурення 800 хв. з рівня 800 до 798  $^\circ\text{C}$  (рис. 7).

Для аналізу точності роботи системи керування створено додатковий блок контролю, який обчислює відхилення значення температур  $T_{low}$  і  $T_{upp}$  від заданого значення  $SP$  (рис. 5) та різницю температур  $e_3$

$$e_1 = SP - T_{upp}; \quad e_2 = SP - T_{low}; \quad e_3 = T_{low} - T_{upp}.$$

Таким чином, можна контролювати відхилення температур  $T_{low}$  та  $T_{upp}$  від профілю та різницю температур між ними, адже ці параметри регламентуються режимом термічної обробки.

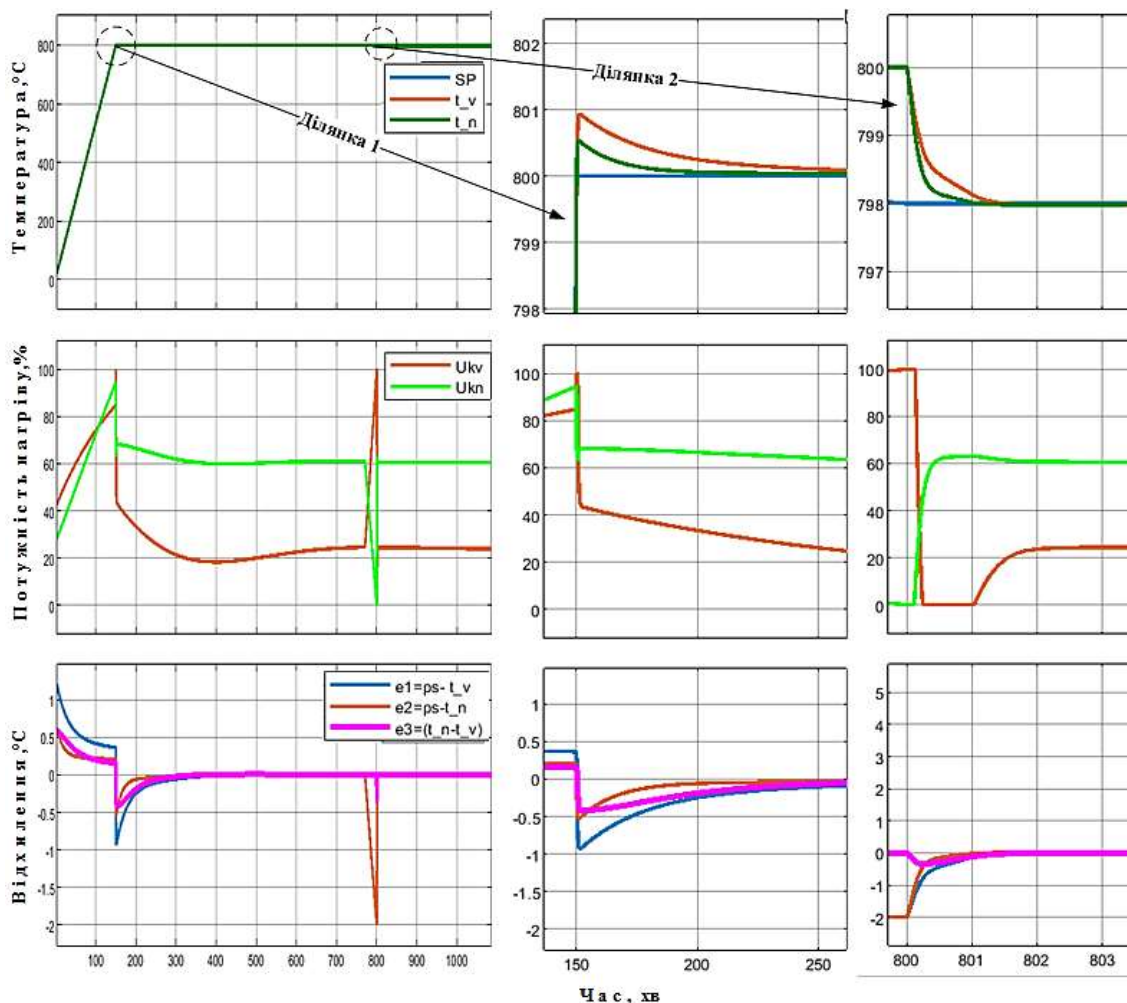


Рисунок 7 – Графічне представлення результатів дослідження автономної САК

Таблиця 2 – Налаштування та оцінка показників якості роботи САР

Параметри	Регулятор Wp1	Регулятор Wp2
Схема САК	Варіант 1	
Налаштування регулятора	P=81.5; I=11.8 хв <sup>-1</sup> ; D=0; N=100	P=26.6; I=1.01 хв <sup>-1</sup> ; D=0.029 хв; N=498
Час наростання, хв	0.66	0.5
Час регулювання, хв	6.34	0.86
Перерегулювання, %	3.55	0.35
Запас по амплітуді, dB	∞	∞
Запас по фазі, град.	87.4	90
Схема САК	Варіант 2	
Налаштування регулятора	P=181.7; I=3.48хв <sup>-1</sup> ; D=0.0032хв; N=249.7	P=30.76; I=1.37хв <sup>-1</sup> ; D=0.092хв; N=18.55
Час наростання, хв	1.1	0.37
Час регулювання, хв	1.79	0.55
Перерегулювання, %	0	1.98
Запас по амплітуді, dB	∞	∞
Запас по фазі, град.	90	85.9
Схема АСР	Варіант 3	
Налаштування регулятора	P=109.8; I=3.85 хв <sup>-1</sup> ; D=0.159; N=457.6	P=42.5; I=2.59 хв <sup>-1</sup> ; D=0.018 хв; N=797
Час наростання, хв	0.54	0.31
Час регулювання, хв	0.93	0.528
Перерегулювання, %	0.46	0.49
Запас по амплітуді, dB	∞	∞
Запас по фазі, град.	90	89.8

Даний перелік елементів є необхідним для реалізації імітаційних моделей САК для варіантів, зображених на рис. 2 і 3. Для реалізації автономної системи регулювання необхідний додатковий динамічний коректор (компенсатор перехресних зв'язків), який реалізований *Sub*блоком «Коректор» з використанням отриманих в [13] та спрощених в [14] залежностей, що ґрунтуються на дослідженнях розподілу енергії за станами на базі сингулярних чисел Ганкеля.

Для реалізації систем регулювання застосовуємо стандартний ПІД-регулятор з паралельною структурою

$$W_p(s) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N(\frac{1}{s})},$$

де  $P, I, D, N$  – відповідно параметри налаштування пропорційної, інтегральної та диференційної складової регулятора.

Регулятори для всіх синтезованих систем попередньо налаштовували в додатку *PIDTuner* [15]. Для якісної роботи системи необхідне їх ручне підлаштування, оскільки процедура *PID Tuner* розрахована на оптимізацію при стрибкоподібних впливах. У нашому випадку профіль температури є функцією часу. Параметри налаштування ПІД-регуляторів та показники якості роботи синтезованих систем регулювання при одиничному стрибкоподібному впливі зведені в табл. 2. Показники якості регулювання в табл. 2 вказані для режиму відпрацювання стрибкоподібної зміни завдання.

Графічну інтерпретацію результатів дослідження автономної системи регулювання (рис. 5) зображено на рис. 7. Окремі фрагменти роботи системи зображені на масштабованих рисунках праворуч: ділянка 1 – відпрацювання переходу з похилого треку на плато

Таблиця 3 – Параметри якості роботи САР з програмним пристроєм

Показники	Ділянка SP(t)	
	Похила (0-150хв)	Вихід на плато
Схема САК	Варіант 1	
Максимальне /середнє відхилення від SP, °C	0.9/0.5	0.65
Максимальна/середня розбіжність температур в контрольних точках, °C	0.7/0.5	0.35/0.1
Час виходу на усталене значення( $\Delta=\pm 0.1^\circ\text{C}$ ) з опорної точки (800°C), хв.	-	70
Схема САК	Варіант 2	
Максимальне/середнє відхилення від SP, °C	1.2/0.5	0.7/0.2
Максимальна/середня розбіжність температур в контрольних точках, °C	0.22/0.15	0.12/0.08
Час виходу на усталене значення ( $\Delta=\pm 0.1^\circ\text{C}$ ) з опорної точки(800°C), хв	-	102
Схема САК (спрощений компенсатор)	Варіант 3	
Максимальне відхилення від SP, °C	0.9/0.5	0.9/0.25
Максимальне розбіжність температур в контрольних точках, °C	0.6/0.25	0.4/0.1
Час виходу на усталене значення ( $\Delta=\pm 0.1^\circ\text{C}$ ) з опорної точки (800°C), хв	-	100

профілю; ділянка 2 – реакція на стрибкоподібну зміну заданої температури (з 800 до 798 °C) за рахунок дії блоку *Step*. Як бачимо, синтезована автономна система добре відпрацьовує наростаючу ділянку набору температури (відхилення від профілю складає не більше 1 °C), час стабілізації температури при виході на плато не перевищує 100 хв., а при стрибкоподібній зміні завдання – не більше 1 хв.

Консолідовані показники якості для всіх варіантів реалізації синтезованих САК (рис. 2 – 4) за відгуком системи на стрибкоподібну зміну завдання зведені в табл. 2, а відпрацювання температурного профілю, який змінюється в часі – в табл. 3.

За всіма показниками при стандартному ступеневому збуренні за сигналом завдання синтезовані варіанти схем є працездатними і мають якісні показники роботи, які задовольняють вимогам технологічного регламенту.

Слід зазначити, що дещо кращі показники (табл. 2) за першими трьома параметрами має варіант 3 з використанням коректора. Однак слід підкреслити, що при значному

розбалансуванні ( $>10^\circ\text{C}$ ) між заданим значенням та вимірним параметром компенсатор втрачає компенсаційні властивості за рахунок виходу керуючого сигналу на обмеження, які є технічно необхідними при керуванні потужністю нагрівання.

Аналіз показників якості роботи САР (табл. 3), де зведені параметри при відпрацюванні температурного профілю термообробки при роботі з програмним пристроєм, показує, що всі запропоновані варіанти можна рекомендувати для практичного використання.

Варіант 2 (багатоконтурна САК з відстежувальним контуром) краще підтримує рівність температур в контрольних точках (розбаланс між ними складає 0.12...0.15°C) впродовж всього температурного профілю, а це більше у 2–3 рази від інших схем за наближених інших показників. Час виходу на усталене значення при переході на плато профілю є меншим для варіанту 1 (70 хв. у порівнянні приблизно зі 100 хв. для інших варіантів).

Розглянемо технічні аспекти реалізації синтезованих систем керування та компенсаторів.

Для практичної реалізації компенсаторів скористаємось результатами дослідження [14, 16]. Редуковані моделі компенсаторів [16] представлені такими передавальними функціями:

$$\begin{aligned}
 w_{11}(s) &= \frac{2.452s^3 + 0.06121s^2 + 0.0007002s + 3.592 \cdot 10^{-6}}{s^3 + 0.01809s^2 + 0.0001535s + 5.341 \cdot 10^{-7}}; \\
 w_{12}(s) &= \frac{-0.3657s^3 - 0.01278s^2 - 0.0001804s - 1.069 \cdot 10^{-6}}{s^3 + 0.01861s^2 + 0.0001519s + 4.965 \cdot 10^{-7}}; \\
 w_{21}(s) &= \frac{-9.741s^3 - 0.1995s^2 - 0.002326s - 1.128 \cdot 10^{-5}}{s^3 + 0.01839s^2 + 0.00017s + 6.315 \cdot 10^{-7}}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Застосувавши методику, наведену в [16], перейдемо в дискретну область, використавши z-перетворення з часом квантування  $t_0 = 1xв$ . Після розкладання в паралельну форму [13] та подання виразу за степенями  $z^{-1}$  отримаємо залежності для технічної реалізації каналних компенсаторів.

Оскільки всі передавальні функції  $w_{ij}(z)$  мають один простий і два комплексно-спряжені полюси, то подання буде складатись з вільного члена та двох рекурсивних ланок 2-го порядку, одна з яких вироджується у ланку першого порядку, тобто

$$w_{*}(z) = C^* + \frac{c_{11}^* \cdot z^{-1}}{1 + d_{11}^* \cdot z^{-1}} + \frac{c_{12}^* \cdot z^{-1} + c_{22}^* \cdot z^{-2}}{1 + d_{12}^* \cdot z^{-1} + d_{22}^* \cdot z^{-2}},$$

де \* - модифікатор каналного коректора (ij); C, c<sub>0</sub>, ..., c<sub>2</sub>, d<sub>0</sub>, ..., d<sub>2</sub> - коефіцієнти розкладу.

Співвідношення вхід/вихід лінійної дискретної системи однозначно пов'язане з його основною характеристикою в z-області і має вигляд лінійного різницевого рівняння:

$$\begin{aligned}
 y_*(n) &= y_*^0(n) + y_*^1(n) + y_*^2(n); \\
 y_*^0(n) &= C^* x_i(n); \\
 y_*^1(n) &= c_{11}^* x_i(n-1) - d_{11}^* y_*^1(n-1); \\
 y_*^2(n) &= c_{12}^* x_i(n-1) + c_{22}^* x_i(n-2) - d_{12}^* y_*^2(n-1) - d_{22}^* y_*^2(n-2).
 \end{aligned} \tag{3}$$

де  $x(n) \dots x(n-2)$ ,  $y(n) \dots y(n-2)$  значення вхідного та вихідних сигналів на відповідному такті квантування.

Параметри представлення коректорів у паралельній формі відображено у табл. 4.

**Таблиця 4 – Параметри розкладу в z-області для синтезованих компенсаторів з періоді квантування 1хв**

Параметр	Канальний компенсатор		
	$w_{11}(z) = w_{22}(z)$	$w_{12}(z)$	$w_{21}(z)$
C	2.4356	-0.3597	-9.7208
c <sub>11</sub>	0.01759	-0.0079	-0.02419
d <sub>11</sub>	-0.993	-0.993	-0.993
c <sub>12</sub>	-0.000764	0.001929	0.003972
c <sub>22</sub>	0.0008987	-	-
d <sub>12</sub>	-1.989	-1.988	-1.989
d <sub>22</sub>	0.989	0.9885	0.9887

Система керування муфельною піччю термообробки має тривірневу ієрархічну структуру (рис. 8.) і значна її частина реалізована на технічних засобах підприємства «Мікрол» (Україна) [12]. Верхній рівень SCADA системи – автоматизоване робоче місце персоналу на базі промислового комп'ютера та місцевої панелі оператора НМІ сМЕ-іV5 фірми Waintek. На цьому рівні розгорнута SCADA система SmartRevie з архівною станцією та мнемосхемою.

Середній рівень – рівень контролерів. Він представлений засобами регулювання (двоканальний програмний регулятор МІК-344-К7) для реалізації контурів регулювання температури відповідно до заданого профілю термообробки (реалізація рис. 2 та рис. 3). Регулятор має два послідовних інтерфейси RS-485 з

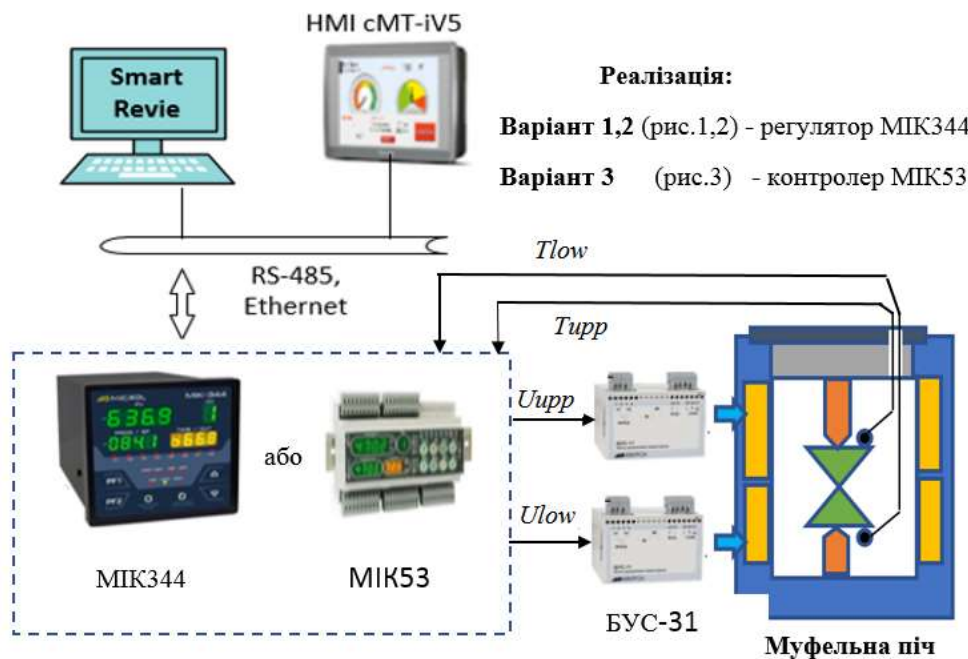


Рисунок 8 – Функціональна схема керування вузлом термічної обробки заготовок

протоколом зв'язку Modbus режим RTU (Remote Terminal Unit) та інтерфейс Ethernet з протоколом зв'язку - Modbus режим TCP (Slave). Крім того, точність вимірювання температури складає  $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$  ТХА (К), що є важливою умовою застосування пристрою для підтримування температури в межах  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рівні контролерів для реалізації схеми рис. 4 доцільно застосувати PLC МІК-52Н з модулем розширення МР-51Н-11, що дозволить в одному пристрої, окрім програмних регуляторів, реалізувати також компенсатор. Але даний пристрій має дещо гірші метрологічні характеристики і володіє тільки одним інтерфейсним каналом RS-485 для організації цифрового обміну.

Нижній рівень системи представлений давачами контролю температури (термопары ТХА (К) з діапазоном вимірювання від мінус  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  до плюс  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) та виконавчими пристроями (симісторний підсилювач потужності БУС-31 з число-імпульсним керуванням та нагрівні тени).

Програмне забезпечення для контролера МІК-52 розробляється в інструментальній середовищі «Альфа»

мовою FBD. Спрощене функціонально блокове представлення програми користувача зображено на рис. 9.

Програма користувача ґрунтується на бібліотечних алгоритмах, що є основою функціональних блоків. Введення значення температур для контрольних точок здійснюється через блоки 1 (бібліотечний алгоритм *AIN*), які пов'язані з апаратною частиною вводу контролера і реалізують цифро-аналогове перетворення та забезпечують калібрування сигналу. Блок 2 відтворює функції програмного за датчика  $SP(t)$  і формує профіль нагрівання заготовки в печі (основні алгоритми *PRG*), а базові точки треку задаються задатчиками  $SP\_M$  та  $TM\_M$ . На основі заданого  $SP$  та виміряного параметра  $PV$  у блоках 3 (алгоритм *PID*) реалізується ПІД-алгоритм керування, а на виходах регуляторів формуються сигнали  $U_{rv}$ ,  $U_m$ , які є входами компенсаторів.

Типова спрощена функціональна схема канального компенсатора  $w1(z)$  (рис. 9) реалізована у відповідності до різницевого рівняння (3). Вона містить блоки зсувних регістрів FIFO (алгоритм *AVRG*) та блоки 5 сумування з

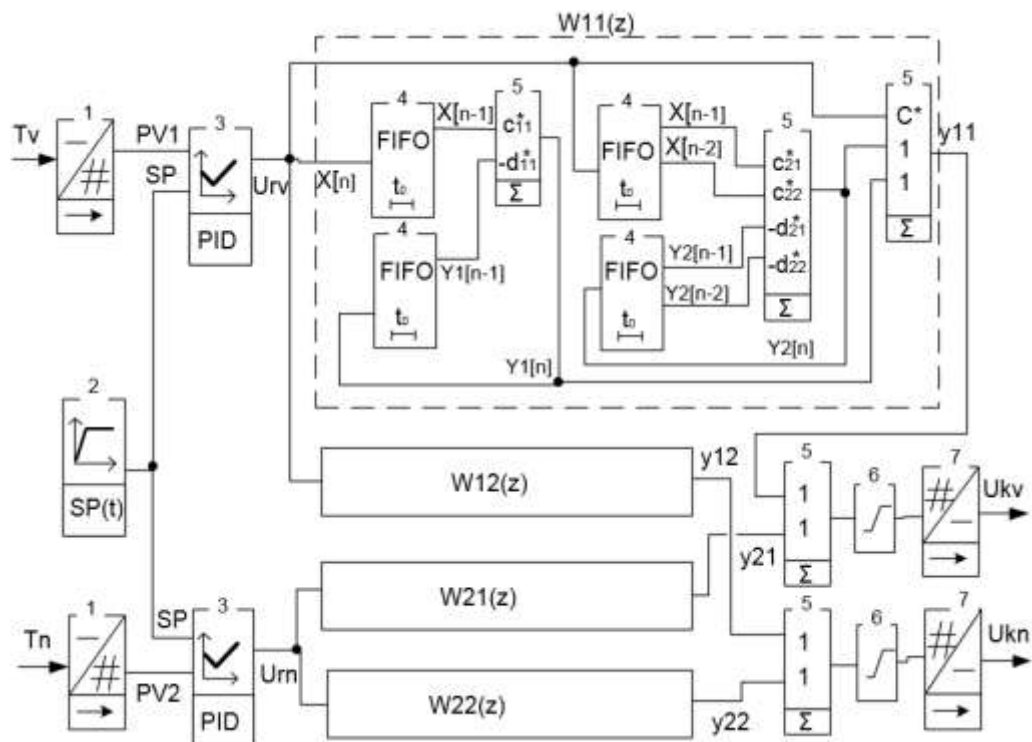


Рисунок 9 – Спрощена функціональна схема програми користувача регулювання температурного режиму у печі термообробки за третім варіантом

масштабуванням (алгоритм *SUMM*). В основі реалізації лежить програмна реалізація секцій 2-порядку детально розглянутих в [11]. Виходи основного та перехресного каналів компенсаторів після сумування та обмеження рівня сигналу в блоках 6 (алгоритм *LIMIT*) виводяться з контролера через блок 7 (алгоритм *AOT*). До даних виходів підключені блоки підсилення потужності БУС-31, які керують потужністю нагріву.

### Висновки

1. За результатами аналізу матриці Брістоля та коефіцієнта зв'язності  $K_{zg}(j\omega)$  встановлено, що об'єкт керування є багатозв'язним і має суттєві перехресні зв'язки між вихідними величинами муфельної печі як об'єкта автоматичного керування.

2. Синтезовано три варіанти реалізації САК температурним режимом печі та методом імітаційного моделювання, проведено їх дослідження. У результаті встановлено, що показники якості роботи синтезованих САК відповідають заявленим технічним вимогам як при

стрибокподібній, так і при програмній у часі зміні завдання. Всі розроблені варіанти САК можуть бути рекомендовані для практичної реалізації в цехах механічної обробки металевих виробів невеликих розмірів.

3. Запропонована структура SCADA системи, її технічна реалізація та програмне забезпечення контролера відповідають вимогам до системи керування температурним режимом термічної обробки металевих заготовок у муфельній печі та можуть знайти практичне застосування в промисловості.

### Список використаних джерел

1. Степанюк Р. А. Спеціальні методи термічної підготовки: навч. посіб. Київ: НТУ «КПІ», 2023. 113 с.
2. Карвацький А.Я., Пулінець І.В., Шилович І.Л. Математична модель теплогидродинамічного стану багатоканальної печі при випалюванні електродних заготовок. *Східно-Європейський журнал передових технологій. Серія: Математика*

і кібернетика – фундаментальні та прикладні аспекти. 2012. Том 1. № 4(55). С. 33 – 37.

3. Lucák Jiří. A Mathematical Model of Thermal Processes in the Empty Electric Muffle Furnace. *Transactionson Electrical Engineering*, 2016. Vol. 5. No. 1. P. 14 -20.

4. Horbiychuk M.I., Lazoriv N.T., Kohutyk M. I., Manuliak I.Z. Experimental research on muffle furnace dynamic properties. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. No 3 (195). P. 144-150 .

5. Programmable Muffle Furnace Instruction Manual 650-750 Series. URL: [https://archive-resources.coleparmer.com/Manual\\_pdfs/33856-15.pdf](https://archive-resources.coleparmer.com/Manual_pdfs/33856-15.pdf).

6. Карпенко Д. В. Розроблення автоматизованої системи керування лабораторної муфельної печі: кваліфікаційна робота. Харків: ХНУРЕ, 2021. 93с.

7. Intisar N. Al-Obaidi1. Design of fuzzy-pd controller for heating system temperature control. *Bilad Alrafidain Journal for Engineering Scienceand Technology*. URL: <https://dx.doi.org/xxxxx/bajest>.

8. Bristol E. On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1966. Vol. 11(1). P. 133–134. DOI:[10.1109/TAC.1966.1098266](https://doi.org/10.1109/TAC.1966.1098266)

9. Горбійчук М. І., Лазорів Н.Т., Когутяк М. І. Синтез автономної системи автоматичного керування температурним режимом муфельної печі. *Journal Věda a perspektivy*. 2023. № 2 (21) P. 387-407.

10. Штіфзон О.Й., Новіков П. В. Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи: Навчальний посібник: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2021. 98 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/9e481f55-c1f2-4e45-ba1e-81c21e0271b8/content>

11. Ray W.H. Advanced Process Control. URL: <https://www.scribd.com/document/262177338/Advanced-Process-Control-by-W-H-Ray>

12. URL: [http://www.microl.ua/index.php?option=com\\_virtuemart&Itemid=71&lang=ru](http://www.microl.ua/index.php?option=com_virtuemart&Itemid=71&lang=ru)

13. Горбійчук М.І., Лазорів Н.Т., Когутяк М.І., Лазорів А.М. Дослідження динамічних властивостей компенсатора перехресних зв'язків автономної системи керування. *Методи та прилади контролю якості*. 2022. № 2(49). С. 74-88.

14. Горбійчук М.І., Лазорів Н.Т., Когутяк М.І., Лазорів А.М. Синтез оптимального за параметрами компенсатора перехресних зв'язків автономної системи керування. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського*. Серія: Технічні науки. 2023. № 3. Том 34 (73). С.106 – 114.

15. PID Controller Tuning in Simulink URL: <https://nl.mathworks.com/help/slcontrol/gs/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html>

16. Горбійчук М., Когутяк М., Заячук Я. Практичні аспекти реалізації коректорів автоматичних систем керування. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. 2024. № 1. С. 101-110. DOI: [10.31891/2219-9365-2024-77-13](https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-13)

## References

1. Stepaniuk R. A. Spetsialni metody termichnoi pidhotovky: navch. posib. Kyiv: NTU «KPI», 2023. 113 p. [in Ukrainian]

2. Karvatskyi A.Ia., Pulinets I.V., Shylovych I.L. Matematychna model teplo-hydrodynamichnoho stanu bahatokamernoї pechi pry vypaliuvanni elektrodnykh zahotovok. *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. Serii: Matematika i kibernetika – fundamentalni ta prykladni aspekty*. 2012. Vol. 1. No 4(55). P. 33 – 37. [in Ukrainian]

3. Lucák Jiří. A Mathematical Model of Thermal Processes in the Empty Electric Muffle Furnace. *Transactionson Electrical Engineering*, 2016. Vol. 5. No. 1. P. 14 -20.

4. Horbiychuk M. I., Lazoriv N.T., Kohutyk M. I., ManuliakI.Z. Experimental

research on muffle furnace dynamic properties. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. No 3 (195). P. 144-150.

5. Programmable Muffle Furnace Instruction Manual 650-750 Series. URL: [https://archive-resources.coleparmer.com/Manual\\_pdfs/33856-15.pdf](https://archive-resources.coleparmer.com/Manual_pdfs/33856-15.pdf).

6. Karpenko D.V. Rozroblennia avtomatyzovanoi systemy keruvannia laboratornoi mufelnoi pechi: kvalifikatsiina robota. Kharkiv: KhNURE, 2021. 93p. [in Ukrainian]

7. Intisar N. Al-Obaidi1. Design of fuzzy-pd controller for heating system temperature control. *Bilad Alrafidain Journal for Engineering Scienceand Technology*. URL: <https://dx.doi.org/xxxxx/bajest>.

8. Bristol E. On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1966. Vol. 11(1). P. 133–134. DOI: [10.1109/TAC.1966.1098266](https://doi.org/10.1109/TAC.1966.1098266)

9. Horbiichuk M. I., Lazoriv N.T., Kohutiak M. I. Syntez avtonomnoi systemy avtomatychnoho keruvannia temperaturnym rezhymom mufelnoi pechi. *Journal Věda a perspektivy*. 2023. № 2 (21) P. 387-407. [in Ukrainian]

10. Shtifzon O.I., Novikov P. V. Teoriia avtomatychnoho upravlinnia. Neliniini ta dyskretni systemy. KPI im. Ihoria Sikorskoho. 2021. 98 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/9e481f55-c1f2-4e45-ba1e-81c21e0271b8/content> [in Ukrainian]

11. Ray W.H. Advanced Process Control. URL: <https://www.scribd.com/document/262177338/Advanced-Process-Control-by-W-H-Ray>

12. URL: [http://www.microl.ua/index.php?option=com\\_virtuemart&Itemid=71&lang=ru](http://www.microl.ua/index.php?option=com_virtuemart&Itemid=71&lang=ru)

13. Horbiichuk M.I., Lazoriv N.T., Kohutiak M.I., Lazoriv A.M. Doslidzhennia dynamichnykh vlastyvostei kompensatora perekhresnykh zviazkiv avtonomnoi systemy keruvannia. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2022. No 2(49). P. 74-88. [in Ukrainian]

14. Horbiichuk M. I., Lazoriv N. T., Kohutiak M. I., Lazoriv A. M. Syntez optimalnoho za parametry kompensatora perekhresnykh zviazkiv avtonomnoi systemy keruvannia. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*. 2023. No 3. Vol. 34 (73). P. 106–114. [in Ukrainian]

15. PID Controller Tuning in Simulink URL: <https://nl.mathworks.com/help/slcontrol/gs/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html>

16. Horbiichuk M., Kohutiak M., Zaiachuk Ya. Praktychni aspekty realizatsii korektoriv avtomatychnykh system keruvannia. *Mizhnarodnyi naukovotekhnichni zhurnal «Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh»*. 2024. No 1. P. 101-110. DOI: [10.31891/2219-9365-2024-77-13](https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-13) [in Ukrainian]

#### SYNTHESIS OF EFFICIENT SYSTEMS FOR CONTROLLING THE TEMPERATURE REGIME OF A MUFFLER FURNACE

M. I. Horbiichuk, A. M. Lazoriv,  
M. I. Kohutiak

Ivano-Frankivsk National Technical  
University of Oil and Gas;  
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019,  
Ukraine;  
e-mail: [gorb@nung.edu.ua](mailto:gorb@nung.edu.ua)

УДК 697.85

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-94-104

## РОЗРОБКА НАПІВАВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ АЕРОЗОЛЬНОГО МАСКУВАННЯ ДЛЯ НЕСПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ВІЙСЬКОВОГО ТА ЕВАКУАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУ

*С. С. Некрасов<sup>1</sup>, А. Ю. Довгополов<sup>1</sup>, В. О. Колесник<sup>1</sup>, В. В. Луниць<sup>2</sup>, І. М. Дегтярьов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Сумський державний університет;  
вул. Харківська, 116, м. Суми, 40007, Україна; e-mail: s.nekrasov@otim.sumdu.edu.ua*

<sup>2</sup>*ТОВ Науково-виробнича компанія «Папірус»;  
проспект Перемоги, 8/3, кв. 5, м. Суми, 40020, Україна; e-mail: vcity.sumy.ua*

Актуальність даного дослідження зумовлена великими втратами військами особового складу від FPV дронів та безпілотних літальних апаратів противника, під час ведення активних бойових дій. Застосування такого виду озброєння не дозволяє проводити швидку евакуацію поранених бійців із поля бою та призводить до незворотних втрат особового складу. Задача підвищення рівня захисту військовослужбовців та військових медиків силами і засобами інженерної підтримки, їх маскуванню табельними та нестандартними маскувальними комплектами в умовах ведення бойових дій є досить актуальною задачею, адже її вирішення дозволяє зберегти життя бійців. Дана стаття спрямована на вирішення зазначеної проблеми шляхом розроблення нової напівавтоматичної системи аерозольного маскуванню для неспеціалізованого військового та евакуаційного транспорту, який широко використовується в умовах ведення сучасних бойових дій. Запропонована авторами система аерозольного маскуванню може встановлюватись на будь-який транспортний засіб, що використовується для перевезення особового складу чи для евакуації поранених, шляхом її швидкої інтеграції в конструкцію транспортного засобу. У статті представлено детальний опис конструкції створеної системи аерозольного маскуванню, а також зазначено основні її переваги перед вже існуючими стандартними системи, які широко використовуються в Збройних силах України. Оскільки системи, які знаходяться на озброєні ЗСУ, є морально застарілими та дорогими у виготовленні, виникає потреба в створенні нових недорогих, але, у свою чергу, високоефективних засобах аерозольного маскуванню. Матеріали статті мають практичну значущість для командування військ, оскільки застосування запропонованих методів маскуванню сприятиме підвищенню їхньої живучості в умовах бойових дій та зниженню втрат від атак безпілотних літальних апаратів і FPV дронів.

**Ключові слова:** система аерозольного маскуванню, безпілотні літальні апарати, FPV дрони, маскуванню військової техніки, не спеціалізований військовий та евакуаційний транспорт.

The relevance of this study is due to the large losses of troops and personnel from enemy FPV drones and unmanned aerial vehicles during active hostilities. The use of this type of weapon does not allow for the rapid evacuation of wounded soldiers from the battlefield and leads to irreversible losses of personnel. The task of increasing the level of protection of servicemen and military medics by engineering support forces and means, their camouflage with service and non-standard camouflage kits in the conditions of combat operations is a very urgent task, because its solution allows to save the lives of soldiers. In this regard, this article is aimed at solving this problem by developing a new semi-automatic aerosol camouflage system for non-specialised military and evacuation vehicles, which are widely used in modern warfare. The aerosol camouflage system proposed by the authors can be installed on any vehicle used for the transport of personnel or for the evacuation of the wounded by quickly integrating it into the vehicle structure. The article presents a detailed description of the design of the created aerosol camouflage system, as well as its main advantages over the existing standard systems that are widely used in the Armed Forces of Ukraine. Since the systems currently in service with the Armed Forces of Ukraine are obsolete and expensive to manufacture, there is a need to create new, inexpensive, but highly effective means of aerosol camouflage. The materials of the article are of practical importance for the command of troops, since the use of the proposed camouflage methods will help increase their survivability in combat conditions and reduce losses from attacks by unmanned aerial vehicles and FPV drones.

**Keywords:** aerosol camouflage systems, unmanned aerial vehicles, FPV drones, military equipment camouflage, non-specialised military and evacuation vehicles.

## Вступ

Досвід російсько-української війни демонструє зростаючу активність противника у використанні безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та FPV дронів для ураження наших військових підрозділів, що спрямовано на зниження їхньої боєздатності та здобуття переваги на полі бою [1]. Водночас застосування аерозольних систем маскуванню дозволяє створювати димову завісу, яка ускладнює або навіть повністю унеможлиблює прицільне використання БпЛА та високо-точної зброї. Аналіз сучасних військових конфліктів свідчить, що в умовах аерозольного маскуванню ефективність застосування звичайного озброєння зменшується у 8-12 разів [2, 3, 4]. Застосування аерозольної завіси є доцільним для захисту військовослужбовців від дронів та керованих авіаційних боєприпасів з інфрачервоним та лазерним наведенням.

Аналіз сучасних публікацій щодо розвитку засобів маскуванню дій військ та техніки в умовах ведення активних бойових дій показав, що застосування систем аерозольного маскуванню на полі бою дозволяє захистити військовослужбовців від ударів високоточної зброї противника та дронів [5-15]. Наявні в арсеналі Збройних сил України засоби аерозольного маскуванню є застарілими та не відповідають сучасним вимогам, оскільки були встановлені на спеціалізовану військову техніку ще на заводі-виробнику в минулому столітті. Водночас засоби аерозольного маскуванню, що перебувають на озброєнні Збройних сил України та країн-партнерів [5,7-13], забезпечують багатоспектральне маскуванню, проте їхня вартість залишається високою. Системи аерозольного маскуванню країн-партнерів також встановлюються на спеціалізовану військову техніку на заводі виробнику, тому ці системи не можна використати для неспеціалізованого військового та евакуаційного транспорту, якого зараз дуже багато на фронті.

Повномасштабне вторгнення російської федерації на територію України показало нові підходи в реалізації військових дій. Для виконання бойових завдань бійцями української армії все частіше почали використовуватись цивільні автомобілі. Значного поширення набуло використання автомобілів типу пікап, які використовуються на полі бою для евакуації поранених, доставки особового складу, їжі та боєкомплекту на позиції. Автомобілі цього типу також широко використовуються для створення мобільних вогневих точок. У свою чергу, ці авто є мало захищеними від ураження противника високоточною зброєю чи БпЛА. На сьогоднішній день для захисту цього виду транспорту бійці використовують засоби радіолокаційної боротьби, які не завжди допомагають захистити особовий склад від атаки FPV дронів, особливо від дронів, які працюють на оптоволоконному кабелі чи з використанням штучного інтелекту. На підставі вищезазначеного авторами було прийняте рішення розробити напівавтоматичну систему аерозольного маскуванню, яку можна встановити на будь-який транспортний засіб, що використовується під час виконання бойових завдань. Дана система повинна бути максимально простою в експлуатації, недорогою та за рахунок простих рішень легко встановлюватись на транспортний засіб. Причому система повинна забезпечувати високий захист об'єкта маскуванню. Метою даного дослідження є опис конструкції основних елементів та принципу роботи даної системи, яка успішно виготовлена авторами та проходить випробування в умовах ведення інтенсивних бойових дій.

## Матеріали та методи дослідження

Оскільки більшість військової техніки Збройні сили України отримали в спадок від колишнього Радянського Союзу або від країн-партнерів, то системи аерозольного маскуванню, встановлені на техніці, є або морально застарілими та неефективними,

або дорогими та високоефективними. Однак всіх їх об'єднує одне – це можливість встановлення даних систем лише на спеціалізовану військову техніку на заводі-виробнику.

Для аерозольного маскувannya військової техніки бойові машини ЗСУ найчастіше обладнуються термічно-димовою апаратурою. Найбільш розповсюдженою системою аерозольного маскувannya, що встановлювалася на більшості зразків радянської військової техніки, є система АЕК-902 «Туча» (українською — «Хмара») — радянська система запуску димових гранат з бронетанкової техніки для створення димової завіси [15]. Вона була розроблена у 1979 році фахівцями Науково-дослідного інституту прикладної хімії. Ця система спеціально призначена для встановлення на легкоброньовану техніку та танки і після проходження випробувань у 1980 році була прийнята на озброєння. Її основним завданням є створення димової завіси для маскувannya під час подолання небезпечних ділянок та забезпечення прихованого руху штурмових загонів [16]. Загальний вигляд системи наведено на рисунку 1.



Рисунок 1 – Загальний вигляд системи димового маскувannya АЕК 902 «Туча»

Системами аерозольного маскувannya АЕК-902 "Туча" комплектували таку техніку: танки Т-62, Т-64, Т-72, Т-80, Т-90, броньовані машини піхоти БМП-2, БМП-3, БМД-4, БМД-3, БТР-80, ГАЗ та інші.

Випускалася ця система в кількох варіантах: 902А, 902Б, 902В, 902Г та 902У. Дані модифікації слугували для адаптації до різних типів бронетехніки та специфічних умов експлуатації. Основною

різницею між ними була кількість пускових установок та їх розміщення на техніці. Найпоширенішим було розташування по обидва боки башти чи корпусу техніки, але також існували варіанти встановлення їх позаду башти в один ряд [17].

Система аерозольного маскувannya АЕК-902 "Туча" призначена для встановлення аерозольних димових завіс та для задимлення ділянок місцевості з метою маскувannya. Сама система складається з пускових гладкоствольних стволів різної кількості (в залежності від типу техніки, на яку встановлюється) (рис. 2а). Ці стволи кріпляться нерухомо до військової техніки, а вже потім в них розміщуються димові гранати моделі ЗД17 (рис. 2б).



а) б)  
 Рисунок 2 – Загальний вигляд пускових гладкоствольних стволів системи АЕК 902 «Туча» та димової гранати ЗД17

Основні технічні характеристики системи димового маскувannya АЕК 902 «Туча» зведені до таблиці 1.

Пульт управління системою аерозольного маскувannya «Туча» знаходиться всередині бойової машини, та повністю інтегрований в загальну електротехнічну складову цієї машини. Цей пульт монтується на техніку на заводі-виробнику та не може бути швидко демонтований для встановлення на будь-яку іншу бойову техніку.

**Таблиця 1 – Технічні характеристики системи димового маскування АЕК 902 «Туча» [17] для 81-мм димових гранат 3Д6, 3Д6М та 3Д17**

Характеристики	Величини
Дальність пуску гранат	до 300 м
Початок інтенсивного димоутворення	10-20 с
Тривалість інтенсивного димоутворення	до 2,5 хв
Довжина непрозорої завіси сіро-чорного диму	30-45 м
Висота завіси: близько	8 м
Маса одного пускового ствола	1,35 кг
Вага однієї димової гранати	1,3-1,7 кг
Довжина одного пускового ствола	270 мм

**Таблиця 2 – Технічні характеристики системи аерозольного маскування M257 [18] для 66-мм димових гранат L8A3, M76, M81, M82 та M90**

Характеристики	Величини
Дальність пуску гранат	до 150 м
Початок інтенсивного димоутворення	1-2 с
Тривалість інтенсивного димоутворення	20-60с
Довжина непрозорої завіси сіро-чорного диму	20-35 м
Висота завіси: близько	5-7 м
Маса пускової установки (4 ствола)	5,1 кг
Вага однієї димової гранати	0,42-0,67 кг
Довжина одного пускового ствола	160 мм

Якщо розглядати найпоширеніші системи аерозольного маскування, які встановлюються на військову техніку країн-партнерів України, то найпоширенішими для техніки американського виробництва є система аерозольного маскування M257 (smoke grenade launcher). Ця система встановлювалась на різні типи бойової техніки: бронетранспортери M113 та Stryker, танки M1 Abrams, бронемашини M2/M3 Bradley, багатоцільові броньовані автомобілі HMMWV (Humvee) та інші. Система була розроблена та прийнята на озброєння у 1970-ті роки. Зовнішній вигляд системи зображено на рисунку 3.



**Рисунок 3 – Загальний вигляд американської системи аерозольного маскування моделі M257**

Технічні характеристики системи аерозольного маскування M257 представлені в таблиці 2.

Пульт управління системою аерозольного маскування моделі M257 також стаціонарно вмонтований в загальну конструкцію бойової машини на заводі-виробнику та не має можливості його демонтажу та встановлення на іншу техніку.

Ще однією системою аерозольного маскування, яка зараз використовується для маскування військової техніки Збройних сил України, є система Nebelmittelwurfanlage (з нім. "Установка для викиду димових засобів") – надана європейськими партнерами. Nebelmittelwurfanlage — це система самозахисту військової техніки, призначена для швидкого створення аерозольної завіси. Її застосування дозволяє бронетехніці уникнути візуального спостереження противником або виявлення за допомогою електрооптичних датчиків під час бою чи наявності потенційної загрози. Завдяки димовій завісі техніка може безпечніше змінювати позицію, здійснювати відступ або виконувати інші тактичні маневри. Зовнішній вигляд цієї установки представлено на рисунку 4 [19].



Рисунок 4 – Загальний вигляд системи аерозольного маскувння Nebelmittelwurfanlage

Зазначена система має калібр 76 мм та використовує димові шашки DM55A і DM35. Спочатку ці системи встановлювалися на зенітні самохідні артилерійські установки Gepard, які надійшли на озброєння збройних сил Німеччини, Бельгії та Нідерландів у другій половині 1970-х років [20]. Цікавим є той факт, що своє перше бойове застосування ці установки отримали лише у 2022 році під час російсько-української війни [21].

На жаль, доступні джерела містять обмежену інформацію про старі моделі гранат, однак сучасний виробник Rheinmetall продовжує виготовляти нові типи боєприпасів, зокрема димові гранати «Maske» та «ROSY» [22]. Димова граната «Maske» (рис. 5) призначена для захисту бронетехніки від високоточної зброї, що використовує візуальні або інфрачервоні прилади наведення, систем лазерного освітлення цілей і лазерних далекомірів.

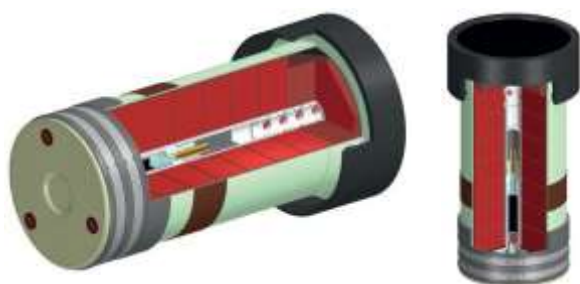


Рисунок 5 – Загальний вигляд 76-мм димової шашки «Maske»

Гранати цього типу забезпечують ефективне багатоспектральне маскувння, що значно знижує точність ворожих

систем наведення. Вони випускаються у різних калібрах, включаючи 66 мм, 76 мм і 80/81 мм, а також у спеціальній американській модифікації МК 1 Mod калібру 66 мм. Крім того, система ROSY (Rapid Obscuring System) має перевагу у створенні аерозольної завіси за лічені секунди, що дозволяє ефективно приховувати військову техніку та підрозділи, навіть у динамічних бойових умовах.

Технічні характеристики системи аерозольного маскувння Nebelmittelwurfanlage представлені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Технічні характеристики системи аерозольного маскувння Nebelmittelwurfanlage [23] для 66, 76, 80,81 мм димові гранат ROSY, Maske

Характеристики	Величини
Дальність пуску гранат	до 180 м
Початок інтенсивного димоутворення	5-10 с
Тривалість інтенсивного димоутворення	20-60с
Довжина непрозорої завіси сіро-чорного диму	30-45 м
Висота завіси: близько	4-7 м
Маса пускової установки (4 ствола)	1,5 кг
Вага однієї димової гранати	0,3-0,52 кг
Довжина одного пускового ствола	190 мм

Недоліком більшості із представлених систем аерозольного маскувння є те, що ці системи мають пульт управління запуском димових гранат, вже інтегрований в конструкцію самої бойової машини. Це унеможливило використання всіх зазначених систем для всіх інших видів техніки, окрім спеціально підготовлених.

### Результати

Основним недоліком всіх вище зазначених систем аерозольного маскувння є неможливість їх встановлення на неспеціалізований

військовий та евакуаційний транспорт. Всі зазначені системи встановлюються на спеціалізовану військову техніку на заводі-виробнику, що унеможливує їх демонтаж та встановлення на іншу техніку. У свою чергу в умовах російсько-української війни, військовими на полі бою, широко використовуються цивільні автомобілі, які також потребують додаткового маскуванню.

На основі вище сказаного, авторами була розроблена напівавтоматична система аерозольного маскуванню («Туман-2М»), яка має можливість встановлення на будь-яку техніку, яка використовується на полі бою. Основною перевагою даної системи є її невисока собівартість виготовлення, простота конструкції та можливість її встановлення на військову техніку чи будь-який інший транспортний засіб, який використовується військовими протягом однієї доби.

Зазначена система складається, з напівавтоматичного пульта управління та комплекту димових мортир (рис. 6), в яких розміщуються димові шашки. Загальний опис конструкції системи наступний: переносний пульт управління розміщується в кабіні автомобіля. До нього має доступ як водій транспортного засобу, так і пасажир, який знаходиться на передньому сидінні. Комплект димових мортир, який може містити від 6 до 9 штук в залежності від конструкції транспортного засобу, розміщується на кузові таким чином щоб забезпечити максимальний захист транспорту. З'єднання пульта управління з димовими мортирами відбувається через броньовані дроти шляхом прокладання їх у вже існуючих комунікаційних каналах транспортного засобу. Живлення пульта управління відбувається від штатної акумуляторної батареї транспортного засобу, або від окремого джерела живлення, розміщеного в салоні транспортного засобу.



**Рисунок 6 – Основні елементи запропонованої авторами напівавтоматичної системи аерозольного маскуванню:**  
а – пульт управління системою; б – димова мортира; в – димова шашка

Ще однією значущою перевагою розробленої системи аерозольного маскуванню є врахування нею метеорологічних даних про напрямок, силу вітру та вологість повітря в тогочасних бойових умовах. Ці дані зчитуються метеорологічною станцією (рис. 7), яка розміщена на даху транспортного засобу, та передає цю інформацію на екран пульта управління. Своєчасна інформація про погодні умови дозволяє військовим прийняти правильне рішення щодо правильного розміщення транспортного засобу та запалу димових шашок з відповідного боку авто для забезпечення максимального захисту.



**Рисунок 7 – Загальний вигляд запропонованої авторами метеорологічної станції напівавтоматичної системи аерозольного маскуванню (а) та інформація про метеорологічні дані, яка передається на екран пульта управління (б)**

Результати польових випробувань розробленої системи показують її високу ефективність в реальних бойових умовах, яку засвідчують військовослужбовці, які нею користуються.



Рисунок 8 – Загальний вигляд задньої частини автомобіля із мортирами розробленої системи аерозольного маскування

Основні технічні характеристики системи аерозольного маскування «Туман-2М» представлені в таблиці 4. Ці характеристики отримані в процесі випробувань. В даний час автори працюють над підвищенням цих характеристик шляхом зміни хімічного складу димової шашки та модернізації конструкції електрозапалювача.

Таблиця 4 – Технічні характеристики напівавтоматичної системи димового маскування «Туман-2М» для 100-мм димових гранат ДГ-100Б

Характеристики	Величини
Початок інтенсивного димоутворення	1-2 с
Тривалість інтенсивного димоутворення	60-80с
Довжина непрозорої завіси сірого диму	35-50 м
Висота завіси: близько	7-10 м
Маса пускової установки	4,2 кг
Вага однієї димової гранати	1,1-1,45 кг
Довжина одного пускового ствола	380 мм

На підставі проведеного дослідження можна зазначити наступне: розроблена авторами напівавтоматична система аерозольного маскування має ряд суттєвих переваг. Дана система може встановлюватись на будь-яку техніку, що використовується на полі бою, має простий доступний кожному для сприйняття пульт управління, за основними технічними характеристикам вона не поступається більшості аналогам, а вартість її виготовлення є значно нижчою за всі інші системи, через використання стандартних компонентів.

### Висновки

Враховуючи відсутність у Збройних силах України великої кількості засобів аерозольного маскування та високу ефективність такого маскування для зниження втрат особового складу та техніки, задача розробки нових систем постановки аерозольних завіс є актуальною.

Авторами дослідження була розроблена нова високоефективна система аерозольного маскування, яка за своїми технічними характеристиками не поступається існуючим аналогам, а за деякими навіть їх перевищує. Значущими перевагами запропонованої системи є можливість її встановлення на будь-який вид спеціалізованої чи неспеціалізованої військової техніки, простота конструкції та управління, та невисока собівартість виготовлення та монтажу.

В даний час ця система проходить польові випробування на одному із напрямків лінії бойового зіткнення. Вона встановлена на декілька автомобілів типу пікап, які використовуються для доставки особового складу на позиції та для евакуації поранених з поля бою. Основна задача даної системи - це захист особового складу від FPV-дронів та інших БПЛ, з якою вона успішно справляється.

Подальша робота буде направлена на модернізацію даної системи шляхом зміни хімічного складу димової шашки та конструкції димових мортир. Також авторами планується розроблення автома-

тичної системи аерозольного маскування, яка буде автоматично приймати рішення про постановку димової завіси залежно від бойових та погодних умов.

#### Рекомендації

Матеріали статті становлять практичну цінність для органів управління військами, які під час планування застосування військ виконують розрахунки з визначення потрібного обсягу інженерних заходів захисту для підвищення живучості військ під час бойових дій та зменшення рівня їхніх втрат від БПЛА.

#### Подяки

Дослідження виконано в рамках проекту молодих вчених «Розроблення автоматизованого комплексу керування системою димового захисту евакуаційного автотранспорту та мобільних вогневих точок» (ДР № 0124U000538, 2024–2025 рр.), який фінансується Міністерством освіти та науки України.

#### Список використаних джерел

1. Волощенко О. Оцінювання ефективності захисту військ від безпілотних літальних апаратів силами і засобами інженерної підтримки. *Military Science*. 2023. № 1(1). С. 71-79. DOI: [10.62524/msj.2023.1.1.07](https://doi.org/10.62524/msj.2023.1.1.07)

2. Коритченко К.В., Танцюра І.І., Клімов О. П., Стаховський О.В. Аналіз засобів аерозольної протидії Сухопутних військ Збройних Сил України. *Механіка та машинобудування*. Х.: НТУ “ХПІ. 2021. С. 26-30.

3. Танцюра І., Клімов О., Стаховський, О., Гузенко С. Порівняльний аналіз засобів аерозольного маскування, які знаходяться на озброєнні у Збройних Силах України та армій західних країн-партнерів. *Військово-технічний збірник*. 2024. № 30. С. 8-13. DOI: [10.33577/2312-4458.30.2024.8-13](https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.8-13)

4. Белоусов І. О. Розвиток засобів маскування підрозділів військ (сил) на основі компресійно-детонаційної технології подрібнення аерозолеутворних речовин. Дисер. роб. Х.: НТУ "ХІ", 2021.

5. Dipoma L. Fuel standardization. Directive. United States: N.p., 1988. URL: [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph\\_reports/2005/MR396](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph_reports/2005/MR396)

6. Pike J., Sherman R. M1059A3 Lynx Smoke Generator Carrier. Federation of American Scientists. Military analysis network URL: <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/land/m1059.htm>

7. Pat. US 005665272 Multifuel combustion engine and use in generating obscurant smoke; filed 07.27.1995 published: 09.09.1997 Pril. No: 507960. 9 p.

8. Generator, Rauch, mechanisch: Motorised dual-Verwendungszweck Unit. M56 Coyote (M56A) URL: <https://fas.org/man/dod-101/sys/land/m56.htm>

9. Carrier, smoke generator, full tracked, M 1059. Patent: TM 9-2350-261-10. Us Department Of Defense, Department of Defense, Delene Kvasnicka, United States Government US Army, United States. Army, Department of the Army, U. S. Army, Army, DOD, The United States Army, 2005. URL: [www.survivalebooks.com](http://www.survivalebooks.com)

10. Kazmirchuk V.O., Savrun B.Y., Tsybulia S.A. Проблемні питання радіаційного, хімічного, біологічного захисту механізованої бригади при веденні бойових дій в контексті сучасної теорії та практики воєнних конфліктів. *Військово-технічний збірник*. 2014. № 10. С. 87-95.

11. Голубничий Д. Ю., Євстрат Д. І., Калачова В.В., Запара Д.М., Новіченко С.В., Лисиця А.О. Аналіз ефективності рішення задач дискретної оптимізації. Scientific Collection «interconf», (35): The Proceedings of the 1 st International Scientific and Practical Conference «Experimental and Theoretical Research in Modern Science». November 16-18, 2020. Kishinev, Moldova: Giperion Editura, 2020. P. 613 – 620.

12. Танцюра І.І., Коритченко К.В., Стаховський О.В., Клімов О.П., Шматков В.А., Лівінцев О.В. Експериментальне дослідження теплових умов формування аерозолі з графіту марки ГВ50/12 в силовій установці танка Т-64Б. *Військово-*

технічний збірник. Л.: НАСВ, 2023. Вип. 28. С. 53-59.

13. Остапчук Є.С., Абрамсон А.Н., Заплішна А.І. Актуальність аерозольного маскування в умовах сучасних бойових дій. *Хімічна технологія: наука економіка та виробництво: збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Шостка, 23-25 листопада 2022 р.: Сумський державний університет, 2022. С. 75-79.

14. Гутченко О. А., Гутченко К. С., Тихонов І. М., Ушмаров П. В. Розвиток засобів маскування дій військ та об'єктів із застосуванням аерозолів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2014. № 3 (16). Харків. С. 154-157.

15. Андрущенко Д. АЕК-902 "Туча". PSDinfo. URL: <https://www.psdinfo.pro/post/аек-902-туча>

16. Шамко В. Є., Жарик О. М., Коваль В. В. Розвиток форм і способів застосування Повітряних Сил Збройних Сил України в сучасних умовах ведення збройної боротьби. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 2. С. 9-15.

17. Сховатись за "Хмарою": як в ЗСУ усучаснюють радянські системи димових завіс (фото). War Telegraf. URL: <https://war.telegraf.com.ua/ukr/war-in-ukraine/2024-06-13/5857537-skhovatis-za-khmaroyu-yak-v-zsu-usuchasnyuyut-radyanski-sistemi-dimovikh-zavis-foto>

18. U.S. vehicle grenade launchers. Gary's Place. URL: <https://www.inetres.com/gp/military/cv/weapon/launchers.html>

19. Nebelmittelwurfanlage. Wayback Machine. URL: <https://web.archive.org/web/20160610143138/http://www.herkules-ahrzeuglogistik.de/produkte/schutz-sicherheitsausrustung/nebelmittelwurfanlage>

20. Marktführer für hochgeschützte Rad- und Kettenfahrzeuge in Europa. KNDS. URL: <https://www.knds.de/systeme-produkte/kettenfahrzeuge/flugabwehrsysteme/gepard-1-a2/>

21. Сафронов Т. Gepard – “хижак” ППО України. Mylytarnyi. URL:

<https://mil.in.ua/uk/articles/gepard-hyzhak-ppo-ukrayiny/>

22. Nebelschutzsysteme für Landfahrzeuge. Dynamischer Schutz. URL: <https://www.rheinmetall.com/de/produkte/schutzsysteme/schutzsysteme-landfahrzeuge/nebelschutzsysteme>

23. Maske smoke grenade 76 mm. Multispectral protection for combat vehicles. Rheinmetall. URL: <https://www.rheinmetall.com/Rheinmetall%20Group/brochure-download/Protection-Systems/D217e0522-Maske-76mm-smoke-grenade.pdf>

## References

1. Voloshchenko O. Otsiniuvannia efektyvnosti zakhystu viisk vid bezpilotnykh litalnykh aparativ sylamy i zasobamy inzhenernoi pidtrymky. *Military Science*. 2023. No 1(1). P. 71-79. DOI: 10.62524/msj.2023.1.1.07 [in Ukrainian]

2. Korytchenko K.V., Tantsiura I.I., Klimov O.P., Stakhovskyi O.V. Analiz zasobiv aerezolnoi protydii Sukhoputnykh viisk Zbroinykh Syl Ukrainy. *Mekhanika ta mashynobuduvannia*. 2021. P. 26-30. [in Ukrainian]

3. Tantsiura I., Klimov O., Stakhovskyi, O., Huzenko S. Porivnialnyi analiz zasobiv aerezolnoho maskuvannia, yaki znakhodiatsia na ozbroienni u Zbroinykh Sylakh Ukrainy ta armii zakhidnykh krain-partneriv. *Viiskovotekhnichniy zbirnyk*. 2024. (30). P. 8-13. DOI: 10.33577/2312-4458.30.2024.8-13 [in Ukrainian]

4. Bielousov I.O. Rozvytok zasobiv maskuvannia pidrozdiliv viisk (syl) na osnovi kompresiino-detonatsiinoi tekhnolohii podribnennia aerezoleutvornykh rehovyn. *Dyser. rob. Kh.: NTU "KhI"*, 2021. [in Ukrainian]

5. Dipoma L. Fuel standardization. Directive. United States: N.p., 1988. URL: [https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph\\_reports/2005/MR396](https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph_reports/2005/MR396)

6. Pike J., Sherman R. M1059A3 Lynx Smoke Generator Carrier. Federation of

American Scientists. Military analysis network URL: <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/land/m1059.htm>

7. Pat. US 005665272 Multifuel combustion engine and use in generating obscurant smoke; filed 07.27.1995 published: 09.09.1997 Pril. No: 507960. 9 p.

8. Generator, Rauch, mechanisch: Motorised dual-Verwendungszweck Unit. M56 Coyote (M56A) URL: <https://fas.org/man/dod-101/sys/land/m56.htm>

9. Carrier, smoke generator, full tracked, M 1059. Patent: TM 9-2350-261-10. Us Department Of Defense, Department of Defense, Delene Kvasnicka, United States Government US Army, United States. Army, Department of the Army, U. S. Army, Army, DOD, The United States Army, 2005. URL: [www.survivalebooks.com](http://www.survivalebooks.com)

10. Kazmirchuk V. O., Savrun B. Y., Tsybulia S. A. Problemni pytannia radiatsiinoho, khimichnoho, biolohichnoho zakhystu mekhanizovanoi bryhady pry vedenni boiovykh dii v konteksti suchasnoi teorii ta praktyky voienykh konfliktiv. *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk*. 2014. No 10. P. 87-95. [in Ukrainian]

11. Holubnychyi D. Yu., Yevstrat D. I., Kalachova V. V., Zapara D. M., Novichenko S. V., Lysytsia A. O. Analiz efektyvnosti rishennia zadach dyskretnoi optymizatsii. Scientific Collection «interconf», (35): The Proceedings of the 1 st International Scientific and Practical Conference «Experimental and Theoretical Research in Modern Science». November 16-18, 2020. Kishinev, Moldova: Giperion Editura, 2020. P. 613 – 620. [in Ukrainian]

12. Tantsiura I.I., Korytchenko K.V., Stakhovskiy O.V., Klimov O.P., Shmatkov V.A., Linivtsev O.V. Eksperymentalne doslidzhennia teplovykh umov formuvannia aerosoliu z hrafitu marky HV50/12 v sylovii ustanovtsi tanka T-64B. *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk*. L.: NASV, 2023. Vol. 28. P. 53-59. [in Ukrainian]

13. Ostapchuk Ye.S., Abramson A.N., Zaplishna A.I. Aktualnist aerosolnoho maskuvannia v umovakh suchasnykh boiovykh dii.

*Khimichna tekhnolohiia: nauka ekonomika ta vyrobnytstvo: zbirnyk naukovykh prats VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, m. Shostka, 23-25.11.2022. Sumskyi derzhavnyi universytet, 2022. P. 75-79. [in Ukrainian]

14. Hutchenko O. A., Hutchenko K. S., Tykhonov I. M., Ushmarov P. V. Rozvytok zasobiv maskuvannia dii viisk ta obektiv iz zastosuvanniam aerosoliv. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 2014. No 3 (16). Kharkiv. P. 154-157. [in Ukrainian]

15. Andrushchenko D. AEK-902 "Tucha". PSDinfo. URL: <https://www.psdinfo.pro/post/aek-902-tucha> [in Ukrainian]

16. Shamko V. Ye., Zharyk O. M., Koval V. V. Rozvytok form i sposobiv zastosuvannia Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy v suchasnykh umovakh vedennia zbroinoi borotby. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 2018. No 2. P.9-15. [in Ukrainian]

17. Skhovatys za "Khmaroiu": yak v ZSU usuchasniuiut radianski systemy dymovykh zavis (foto). War Telegraf. URL: <https://war.telegraf.com.ua/ukr/war-in-ukraine/2024-06-13/5857537-skhovatis-za-khmaroyu-yak-v-zsu-usuchasnyuyut-radyanski-sistemi-dimovikh-zavis-foto> [in Ukrainian]

18. U.S. vehicle grenade launchers. Gary's Place. URL: <https://www.inetres.com/gp/military/cv/weapon/launchers.html>

19. Nebelmittelwurfanlage. Wayback Machine. URL: <https://web.archive.org/web/20160610143138/http://www.herkules-ahrzeuglogistik.de/produkte/schutz-sicherheitsausrustung/nebelmittelwurfanlage>

20. Marktführer für hochgeschützte Rad- und Kettenfahrzeuge in Europa. KNDS. URL: <https://www.knds.de/systeme-produkte/kettenfahrzeuge/flugabwehrsysteme/gepard-1-a2/> [in German]

21. Safronov T. Gepapd – “khyzhak” PPO Ukrainy. Mylytarnyi. URL: <https://mil.in.ua/uk/articles/gepard-hyzhak-ppo-ukrayiny/>

22. Nebelschutzsysteme für Landfahrzeuge. Dynamischer Schutz.

Dynamischer Schutz. Rheinmetall. URL:  
<https://www.rheinmetall.com/de/produkte/schutzsysteme/schutzsysteme-landfahrzeuge/nebelschutzsysteme> [in German]

23. Maske smoke grenade 76 mm.  
Multispectral protection for combat vehicles.  
Rheinmetall.

URL:  
<https://www.rheinmetall.com/Rheinmetall%20Group/brochure-download/Protection-Systems/D217e0522-Maske-76mm-smoke-grenade.pdf>

**ENGINEERING OF A SEMI-AUTOMATIC  
AEROSOL CAMOUFLAGE SYSTEM FOR  
NON-SPECIALISED MILITARY AND  
EVACUATION VEHICLES**

S. S. Nekrasov<sup>1</sup>, A. Yu. Dovhopolov<sup>1</sup>,  
V. O. Kolesnyk<sup>1</sup>, V.V. Lupyr<sup>2</sup>,  
I. M. Dehtiarov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sumy State University; 116, Kharkivska str., Sumy,  
40007, Ukraine;

e-mail: [s.nekrasov@omim.sumdu.edu.ua](mailto:s.nekrasov@omim.sumdu.edu.ua),

<sup>2</sup>General Director of LLC Scientific and Production  
Company 'Papyrus';

8/3 Peremohy Avenue, Sumy, 40020, Ukraine;  
e-mail: [vcity.sumy.ua](mailto:vcity.sumy.ua)

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ, ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТА ДИСКРЕТНІ СТРУКТУРИ

УДК 519.2

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-105-113

## КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕКОНОМІЧНОГО ЗРОСТАННЯ

*В. В. Кравців, М. В. Марцінків, Т. В. Вівчар*

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;*

*вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна; e-mail:*

*viktorii.kravtsiv@pnu.edu.ua, maria.martsinkiv@pnu.edu.ua, tetiana.vivchar.21@pnu.edu.ua*

Проведено комплексний аналіз математичних моделей, що широко використовуються в економічній теорії для моделювання попиту, виробництва та економічного зростання. Зокрема, показано застосування еластичності як економічного змісту похідної для побудови виробничої функції та її застосування до моделей дослідження економічного зростання. Особлива увага приділяється обмеженням та викликам, з якими стикаються дослідники при розробці та впровадженні моделей. Моделі, які розглядаються, є потужними інструментами для вивчення економічних процесів, однак кожна з них має як сильні, так і слабкі сторони, що визначають їх ефективність і можливість застосування в різних умовах. Математична частина кожної з моделей надає чітке уявлення про структуру економічних процесів і дозволяє здійснювати кількісний аналіз. Проте всі ці моделі базуються на математичних формулах та певних припущеннях і спрощеннях, які можуть обмежувати їхню застосовність у реальних економічних умовах. У статті також розглядається важливість вибору правильних математичних методів для аналізу цих моделей. Важливим є підхід до адаптації параметрів моделей для реальних умов, що часто вимагає модифікації математичних виразів і врахування додаткових факторів. У зв'язку з цим важливою є роль чисельних методів для знаходження розв'язків складних систем рівнянь, а також використання методів оптимізації та апроксимації для досягнення більш точних результатів. Незважаючи на численні переваги, математичні моделі економічних процесів мають певні обмеження. Їх застосування у реальному світі часто вимагає врахування множинних зовнішніх змінних, які можуть не входити до базових математичних структур моделей. Однак для теоретичних досліджень та побудови початкових оцінок ці моделі є ефективними інструментами для розуміння та прогнозування економічних процесів. У підсумку, усі моделі мають важливі застосування, але для їх максимальної ефективності необхідно коригувати їх під реальні економічні умови, доповнювати новими змінними та враховувати динамічність економічних процесів.

**Ключові слова:** еластичність, виробничі функції, модель економічного зростання.

The article provides a comprehensive analysis of mathematical models widely used in economic theory to model demand, production, and economic growth. In particular, it demonstrates the application of elasticity, as the economic meaning of a derivative, for constructing a production function and its application to models of economic growth research. Special attention is given to the limitations and challenges faced by researchers when developing and implementing these models. The models discussed are powerful tools for studying economic processes, but each has both strengths and weaknesses that determine their effectiveness and applicability under different conditions. The mathematical component of each model provides a clear understanding of the structure of economic processes and allows for quantitative analysis. However, all these models are based on mathematical formulas and certain assumptions and simplifications, which may limit their applicability in real-world economic conditions. The article also addresses the importance of choosing the correct mathematical methods for analyzing these models. An important aspect is the approach to adapting model parameters to real conditions, which often requires modifications to mathematical expressions and consideration of additional factors. In this context, the role of numerical methods in solving complex systems of equations, as well as the use of optimization and approximation techniques to achieve more accurate results, is emphasized. Despite numerous advantages, mathematical models of economic processes have certain limitations. Their application in the real world often requires accounting for multiple external variables that may not be included in the basic mathematical structures of the models. However, for theoretical research and

the construction of initial estimates, these models are effective tools for understanding and predicting economic processes. In conclusion, all models have important applications, but to maximize their effectiveness, they need to be adjusted to real economic conditions, supplemented with new variables, and account for the dynamic nature of economic processes.

**Keywords:** elasticity, production function, economical growth model.

## Вступ

Математичні моделі є невід'ємною частиною сучасного аналізу та вирішення економічних задач. Вони дозволяють описати складні економічні процеси, передбачити їх розвиток та оптимізувати різноманітні аспекти економічної діяльності. Застосування математичних методів у економіці дає змогу не лише уточнити теоретичні уявлення про ринкові механізми, але й розробити ефективні стратегії управління для підприємств, урядів та міжнародних організацій.

Математичні моделі в економіці виконують роль важливих інструментів для прогнозування, оптимізації та прийняття рішень у таких сферах, як фінанси, ціноутворення, управління ризиками, макроекономічне планування і багато інших. Вони допомагають виявити закономірності в складних економічних системах, оцінити наслідки різних економічних політик і сценаріїв. Моделювання є важливим засобом для систематизації даних, забезпечення їх точності та надійності, а також для підтримки прийняття зважених рішень у нестабільних умовах [1-5].

У цій статті ми розглянемо основні підходи до використання математичних моделей для вирішення економічних задач, зокрема, типи моделей, їх застосування, а також основні проблеми і обмеження, які можуть виникати під час їх розробки та впровадження.

## Модель еластичності попиту

Модель еластичності попиту описує, як змінюється кількість товару, який споживачі готові придбати, у відповідь на зміну ціни цього товару. Еластичність попиту є важливим економічним показником, який дозволяє оцінити чутливість попиту до змін у цінах і допомагає в прийнятті рішень про

ціноутворення, прогнозуванні попиту та оцінці ефективності економічної політики.

Визначення еластичності попиту:

Еластичність попиту за ціною ( $E_d$ ) визначається як відсоткова зміна кількості попиту ( $\Delta Q$ ) на товар у відповідь на відсоткову зміну ціни ( $\Delta P$ ). Формула виглядає так:

$$E_d = \frac{\% \Delta Q}{\% \Delta P},$$

де  $E_d$  — коефіцієнт еластичності попиту,  $\% \Delta Q$  — відсоткова зміна кількості попиту,  $\% \Delta P$  — відсоткова зміна ціни.

Типи еластичності попиту:

**Еластичний попит ( $E_d > 1$ ):** Якщо попит є еластичним, це означає, що споживачі значно реагують на зміну ціни, і зниження ціни призведе до значного зростання попиту.

**Нееластичний попит ( $E_d < 1$ ):** Якщо попит нееластичний, це означає, що зміна ціни не сильно впливає на кількість товару, який споживачі готові придбати. Наприклад, на основні товари чи ліки попит може бути нееластичним.

**Одинична еластичність ( $E_d = 1$ ):** Це випадок, коли відсоткова зміна ціни точно компенсується відсотковою зміною попиту, тобто зміна ціни пропорційно змінює попит.

**Абсолютно еластичний попит ( $E_d = \infty$ ):** Це теоретичний випадок, при якому навіть найменша зміна ціни призводить до нескінченно великої зміни попиту.

**Абсолютно нееластичний попит ( $E_d = 0$ ):** У цьому випадку попит зовсім не змінюється незалежно від змін ціни, що характерно для товарів першої необхідності.

Фактори, що впливають на еластичність попиту:

Наявність заміників: Якщо є багато заміників товару, попит на нього буде еластичним. Навпаки, якщо заміників мало або немає, попит буде нееластичним.

Часовий фактор: Зазвичай попит є більш еластичним у довгостроковій перспективі, оскільки споживачі мають більше часу для адаптації.

Необхідність товару: Для товарів першої необхідності попит є нееластичним, оскільки споживачі повинні їх купувати незалежно від зміни ціни.

Вартість товару у загальному бюджеті споживача: Для товарів з високою ціною попит зазвичай є більш еластичним, оскільки зміна ціни має більший вплив на бюджет споживача.

Модель еластичності попиту допомагає підприємствам та урядам передбачати, як зміни в цінах впливатимуть на споживчі звички, а також на доходи від продажу товарів та послуг. Модель еластичності попиту в математичному вираженні дозволяє швидко оцінити чутливість попиту до зміни ціни, однак її обмеження полягають у тому, що вона не враховує зміни в інших факторах, таких як доходи споживачів, зміни в пропозиції або зовнішньоекономічні впливи. Сильним моментом є її простота, що дозволяє швидко обчислювати еластичність, але обмеженням є спрощення реальних економічних взаємозв'язків.

### **Модель виробничої функції Кобба-Дугласа**

Модель виробничої функції – це економічна модель, яка описує залежність між кількістю використовуваних факторів виробництва (капіталу і праці) і обсягом виробленого продукту. Вона є однією з найбільш визнаних і використовуваних виробничих функцій в економічному аналізі [6-7].

Модель виробничої функції Кобба-Дугласа [8-12] виражається наступним чином:

$$Q = AL^\alpha K^\beta,$$

де  $Q$  – обсяг виробленої продукції (output),  $A$  – технологічний коефіцієнт або ефективність виробництва, що відображає рівень технологій,  $L$  – кількість праці (input),  $K$  – кількість капіталу (input),  $\alpha, \beta$  – еластичності відповідно щодо праці і капіталу (параметри, що відображають вплив кожного фактора на продукцію).

Капітал ( $K$ ) — це всі інвестиції в технічне оснащення, інфраструктуру, обладнання та інші матеріальні ресурси, які використовуються у виробництві.

Праця ( $L$ ) — це людський ресурс, який використовують для виробництва товарів або послуг.

Технологічний коефіцієнт ( $A$ ) — цей параметр показує, наскільки ефективно комбінуються капітал і праця в процесі виробництва. Вищі значення  $AAA$  відображають більш ефективні технології виробництва.

Еластичності ( $\alpha, \beta$ ) — це параметри, які показують, як змінюється обсяг виробництва при зміні одного з факторів при фіксованому значенні іншого.

### **Особливості моделі Кобба-Дугласа [13-15]:**

Постійні масштаби виробництва: якщо сума параметрів  $\alpha, \beta$  дорівнює 1 ( $\alpha + \beta = 1$ ), це означає, що виробнича функція має постійні масштаби. Тобто, якщо всі фактори виробництва збільшуються на певний коефіцієнт, то і обсяг виробництва збільшиться на такий самий коефіцієнт.

Якщо  $\alpha + \beta < 1$ , це означає, що масштаби зменшуються (умовно знижена ефективність при збільшенні обсягів).

Якщо  $\alpha + \beta > 1$ , це вказує на збільшення масштабів (вища ефективність при збільшенні обсягів).

Еластичність заміщення: модель передбачає, що капітал і праця можуть замішувати один одного, але з певними обмеженнями. Наприклад, збільшення кількості праці може замінити частину капіталу, і навпаки, але цей ефект зазвичай не є нескінченним.

Сумісна продуктивність праці і капіталу: визначення того, як зміна одного з факторів виробництва впливає на виробництво, залежить від значень параметрів  $\alpha, \beta$ . Наприклад, якщо  $\alpha > \beta$ , це означає, що збільшення праці має більший ефект на продукцію порівняно з збільшенням капіталу.

Модель Кобба-Дугласа [16-20] широко використовується для оцінки ефективності виробництва, прогнозування економічного зростання та визначення оптимальних інвестицій в капітал і працю. Вона дозволяє аналізувати:

**Виробничу ефективність:** оцінюючи, як технології ( $A$ ) і фактори виробництва ( $L, K$ ) взаємодіють, можна виявити можливості для підвищення продуктивності.

**Зростання економіки:** за допомогою цієї моделі можна прогнозувати зростання на основі зміни в капіталі, праці та технологіях.

**Визначення еластичності факторів:** модель допомагає зрозуміти, як зміна одного з факторів впливає на загальний обсяг продукції.

#### *Переваги моделі:*

**Простота:** модель є відносно простим способом аналізу виробництва і дозволяє легко визначати важливі економічні параметри.

**Гнучкість:** модель дозволяє вводити різні значення параметрів для конкретних виробничих умов.

**Застосовність у багатьох галузях:** від сільського господарства до виробництва товарів та послуг.

#### *Недоліки моделі:*

**Спрощення реальності:** модель передбачає постійну технологічну ефективність ( $A$ ), що не завжди відповідає реальному світу, де технології можуть змінюватися.

**Неврахування зовнішніх факторів:** Модель не враховує зміни в економічних умовах або зовнішніх шоках, таких як політичні зміни чи природні катастрофи.

Модель Кобба-Дугласа [21-24] є важливим інструментом в економічному

аналізі і допомагає зрозуміти, як оптимально використовувати ресурси для досягнення максимального виробництва. Модель виробничої функції Коба-Дугласа є класичною математичною моделлю, яка дозволяє аналізувати залежність між виробничими факторами, такими як капітал і праця, та обсягом виробництва. Її математична структура є простою та зручною для аналізу, однак модель передбачає сталу еластичність та технологічний прогрес, що обмежує її застосування в умовах динамічних змін. Вона не враховує змін у відносних цінах факторів виробництва, що може призвести до спрощення реальних виробничих процесів.

#### **Модель економічного зростання Домара**

Модель економічного зростання Домара [11] була розроблена економістом Евсеєвим Домаром у 1946 році та є варіантом більш загальної теорії економічного зростання. Вона ґрунтується на простій залежності між заощадженнями, інвестиціями та зростанням національного доходу.

Модель Домара [25-26] спирається на кілька основних ідей:

**Збереження пропорцій:** вона передбачає, що всі інвестиції спрямовуються на розширення капіталу.

**Відсутність технологічного прогресу:** У найпростішому варіанті модель не враховує зміни в технологіях і продуктивності праці.

**Постійна норма заощаджень:** Передбачається, що частина національного доходу, яка заощаджується, є сталою.

Модель може бути виражена у вигляді наступного рівняння:

$$Y = C + I,$$

де  $Y$  – національний дохід (обсяг виробництва),  $C$  – споживчі витрати,  $I$  – інвестиції.

Норма заощаджень  $s$  є частиною доходу, яку економіка заощаджує, тобто:  $S = sY$ .

Загальна інвестиційна функція виглядає так:

$$I = S = sY.$$

Тепер, якщо припустити, що збільшення капіталу  $K$  залежить від інвестицій, ми можемо виразити рівняння зростання як:

$$\dot{K} = I - \delta K,$$

де  $K$  – капітал,  $I$  – інвестиції,  $\delta$  – норма амортизації капіталу.

Тепер можемо визначити, що темпи економічного зростання  $g$  можна виразити

як  $g = \frac{s}{\delta}$ . Тобто, темпи економічного

зростання прямо пропорційні нормі заощаджень  $s$  і обернено пропорційні нормі амортизації капіталу  $\delta$ .

#### **Ключові висновки з моделі Домара**

Основним фактором економічного зростання є рівень заощаджень, які стають інвестиціями, що дозволяють збільшити капітальний фонд.

Для стабільного зростання важливо мати високий рівень інвестицій, оскільки вони прямо впливають на капітальний фонд, що необхідний для виробництва.

#### **Модель економічного зростання Солоу**

Модель економічного зростання Роберта Солоу [27-28] була розроблена в 1956 році і є більш комплексною та реалістичною, оскільки включає не тільки заощадження та інвестиції, а й технологічний прогрес і зміни в продуктивності праці. Це значно покращує здатність моделі описувати реальні економічні процеси.

#### *Основні припущення та структура*

Технологічний прогрес: модель Солоу передбачає, що економіка може зростати завдяки не тільки збільшенню капіталу, а й через покращення технологій, які дозволяють використовувати ресурси ефективніше. Технології ростуть за законом

$$A(t) = A_0 e^{gt},$$

де  $g$  – темп зростання технології.

Накопичення капіталу: капітал у моделі збільшується за рахунок інвестицій, які становлять частку від виробленого

випуску. Ставка накопичення капіталу (або заощаджень) дорівнює  $s$ . Математично це записується так:

$$\dot{K} = sY - \delta K,$$

де  $\dot{K}$  – зміна капіталу,  $sY$  – інвестиції (заощадження),  $\delta$  – ставка амортизації капіталу.

Зростання робочої сили ( $L$ ): чисельність робочої сили зростає з постійним темпом  $n$ , тобто:

$$L(t) = L_0 e^{nt}.$$

Стійкість (усталений стан): модель Солоу передбачає, що в довгостроковій перспективі економіка досягає сталого стану, у якому темпи зростання капіталу, праці та випуску стабілізуються. Це означає, що економіка врешті-решт припиняє рости через спадаючу віддачу від капіталу, і зростання на душу населення та на душу капіталу буде можливим лише за рахунок технологічного прогресу.

Виробнича функція Кобба-Дугласа (уточнена): Це стандартне припущення для моделі Солоу, де обсяг виробництва  $Y$  залежить від капіталу  $K$  і праці  $L$ :

$$Y = AL^{1-\alpha} K^\alpha,$$

де  $A$  – рівень технологічного прогресу,  $K$  – капітал,  $L$  – праця,  $\alpha$  – коефіцієнт еластичності.

Амортизація капіталу: знову ж таки, капітал зношується, тому потрібно постійно інвестувати для його оновлення.

Динаміка капіталу:

$$\dot{K} = I - \delta K,$$

де  $I$  – інвестиції, а  $\delta K$  – амортизація капіталу.

Довгострокова рівновага: в довгостроковій перспективі темп зростання випуску і капіталу на душу населення буде залежати лише від темпу зростання технологій і чисельності робочої сили:

$$g_Y = g_A + n$$

де  $g_Y$  – темп зростання випуску на душу населення,  $g_A$  – темп зростання технологій,  $n$  – темп зростання робочої сили.

### **Основні висновки з моделі Солоу [29-30]**

Короткостроковий ефект від збільшення заощаджень: збільшення норми заощаджень призводить до зростання капіталу і випуску в короткостроковій перспективі. Однак через закон спадної віддачі ефект від цього зростання поступово зменшується.

Довгостроковий ріст через технологічний прогрес: в довгостроковій перспективі сталий економічний ріст можливий лише за рахунок технологічного прогресу, оскільки після досягнення сталого стану капітал на душу населення і випуск на душу населення стабілізуються.

Роль накопичення капіталу: на початкових етапах економічного розвитку збільшення інвестицій (накопичення капіталу) відіграє ключову роль, але в довгостроковій перспективі його вплив на ріст економіки стає менш значущим.

Стан сталого зростання: економіка прагне до стану сталого зростання, де всі основні економічні змінні (випуск, капітал, робоча сила) зростають з темпом, визначеним технологічним прогресом та зростанням робочої сили.

### **Негативні сторони моделі**

Відсутність урахування людського капіталу: модель не враховує людський капітал, який також відіграє важливу роль в економічному зростанні.

Не враховує інституційні фактори: модель не пояснює, як економічні інститути, державна політика або міжнародна торгівля впливають на довгостроковий ріст.

Моделює технології як зовнішній фактор: технологічний прогрес у моделі розглядається як екзогенний процес (який не залежить від інших факторів), хоча на практиці технологічні зміни часто залежать від інвестицій у науку та інновації.

### **Порівняння моделей Домара та Солоу**

Технологічний прогрес: модель Солоу включає технологічний прогрес, що робить її більш динамічною в довгостроковій перспективі. Модель Домара не враховує змін у технологіях.

Роль капіталу: у моделі Домара капітал є основним фактором зростання, тоді як у моделі Солоу, хоча капітал також важливий, але є ефект спадної доходності, і з часом основним фактором стає технологічний прогрес.

Стаціонарний стан: модель Солоу передбачає досягнення стаціонарного стану, тоді як модель Домара вказує на постійне зростання, залежне від інвестицій.

Модель Солоу є більш складною і враховує більше факторів, що дозволяє отримати більш точне уявлення про довгострокове економічне зростання, ніж модель Домара.

Моделі економічного зростання Домара та Солоу є класичними підходами до аналізу довгострокового економічного зростання, і кожна з них фокусується на різних аспектах розвитку економіки, зокрема на факторах, що впливають на темпи зростання виробництва [31-32].

Моделі економічного зростання Домара і Солоу використовуються для вивчення динаміки економічного зростання на основі інвестицій і накопичення капіталу. Математичні вирази цих моделей дозволяють оцінити, як зміни в інвестиціях або заощадженнях можуть вплинути на економічне зростання. Модель Домара, зокрема, має значну простоту, що дозволяє легко здійснювати розрахунки, однак вона не враховує технологічний прогрес, що є суттєвим недоліком у сучасних економічних умовах. Модель Солоу, в свою чергу, додає параметр технологічного прогресу, але її використання обмежене припущенням про постійну відносну ефективність факторів виробництва, що може не відповідати реальним умовам.

### Список використаних джерел

1. Білоцерківський О.Б., Ширяєва Н.В., Замула О.О. Економіко-математичне моделювання: Текст лекцій. Харків: НТУ «ХП», 2010. 108 с.
2. Вітлінський В.В. Моделювання економіки: Навч. посібник. Київ: КНЕУ, 2003. 408 с.
3. Вовк В.М., Зомчак Л.М. Оптимізаційні моделі економіки Навч. посібник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2013. 318 с.
4. Дацко М.В., Карбовник М.В. Дослідження операцій в економіці: навч. посіб. Львів: ПАІС, 2009. 288 с.
5. Івашук О.Т. Економіко-математичне моделювання: Навчальний посібник. Тернопіль: ТНЕУ «Економічна думка», 2008. 704 с.
6. Середюк В.Б. Застосування економіко-математичних методів для розв'язання економічних задач. *Вісник соціально-економічних досліджень*. 2014. Вип. 1 (52). С. 69-73.
7. Янковий В.О. Економіко-математичні властивості виробничої функції Кобба-Дугласа і CES-функції. *Східна Європа: Економіка, бізнес та управління*. 2017. Випуск 2 (07). С. 330-336.
8. Aum Sangmin Why Is the Labor Share Declining? *Review*. 2020. Vol. 102 (4). P. 413-428. DOI: [10.20955/r.102.413-28](https://doi.org/10.20955/r.102.413-28)
9. Barro Robert J., Sala-i-Martin Xavier. Economic growth. The MIT Press, 2004. p. 29, fn. 7.
10. Berndt Ernst R., Christensen Laurits R. The Translog Function and the Substitution of Equipment, Structures, and Labor in U.S. manufacturing 1929–68. *Journal of Econometrics*. 1973. Vol. 1 (1). P. 81–113. DOI: [10.1016/0304-4076\(73\)90007-9](https://doi.org/10.1016/0304-4076(73)90007-9)
11. Boianovsky M. Modeling economic growth: Domar on moving equilibrium CHOPE Working Paper. 2015. № 10. DOI: [10.2139/ssrn.2664149](https://doi.org/10.2139/ssrn.2664149)
12. Brown Murray "Cobb–Douglas Functions". The New Palgrave Dictionary of Economics. Palgrave Macmillan UK. 2017. P. 1–4. DOI: [10.1057/978-1-349-95121-5\\_480-2](https://doi.org/10.1057/978-1-349-95121-5_480-2)
13. Czerwinski A. Mathematics Serving Economics: A Historical Review of Mathematical Methods in Economics. *Symmetry*. 2024. Vol. 16(10), 1271. DOI: [10.3390/sym16101271](https://doi.org/10.3390/sym16101271)
14. Cobb C. W., Douglas, P. H. A Theory of Production. *American Economic Review*. 1928. Vol. 18. P. 139-165. JSTOR 1811556. Retrieved 26 September 2016.
15. Douglas Paul H. The Cobb-Douglas Production Function Once Again: Its History, Its Testing, and Some New Empirical Values. *Journal of Political Economy*, University of Chicago Press. 1976. Vol. 84(5). P. 903-915.
16. Elsby Michael, Hobijn Bart, Sahin Aysegül. The Decline of the U.S. Labor Share (Report). Federal Reserve Bank of San Francisco. Brookings Papers on Economic Activity, Fall 2013.
17. Filipe Jesus, Adams F. Gerard. The Estimation of the Cobb-Douglas Function: A Retrospective View. *Eastern Economic Journal*. 2005. Vol. 31 (3). P. 427–445.
18. Gechert Havranek, Irsova Kolcunova Measuring capital-labor substitution: The importance of method choices and publication bias. *Review of Economic Dynamics*. 2021. Vol. 45. P. 55–82. DOI: [10.1016/j.red.2021.05.003](https://doi.org/10.1016/j.red.2021.05.003)
19. Hájková Dana, Hurník Jaromír. Cobb-Douglas Production Function: The Case of a Converging Economy. *Czech Journal of Economics and Finance (Finance a User)*. 2006. Vol. 57 (9–10) P. 465–476.
20. Hoch Irving. Simultaneous Equation Bias in the Context of the Cobb-Douglas Production Function. *Econometrica*. 1958. Vol. 26 (4). P. 566–578. DOI: [10.2307/1907517](https://doi.org/10.2307/1907517)
21. Houthakker H.S. The Pareto Distribution and the Cobb–Douglas Production Function in Activity Analysis. *The Review of Economic Studies*. 1955. Vol. 23 (1). P. 27–31. DOI: [10.2307/2296148](https://doi.org/10.2307/2296148)
22. Jacques Ian. Mathematics for Economics and Business (Ninth ed.). Harlow, United Kingdom: Pearson Education, 2018. 168 p.

23. Malcolm Pemberton and Nicholas Rau. Mathematics for economists: An introductory textbook, 4th ed. Manchester: Manchester University Press. 2015.

24. Nechyba Thomas J. Microeconomics : an intuitive approach with calculus (2nd ed.). Boston, MA: Cengage Learning. 2017. p. 126.

25. Silberberg Eugene, Suen, Wing. Elasticity of Substitution. The Structure of Economics: A Mathematical Analysis (Third ed.). Boston: Irwin McGraw-Hill. 2001. P. 246–247.

26. Smirnov R., Wang K. The Hamiltonian approach to the problem of derivation of production functions in economic growth theory. 2019. DOI: [10.48550/arXiv.1906.11224](https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.11224)

27. Solow R.M. A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*. 1956. Vol. 70. No 1. P. 65–94.

28. Solow R.M. Technical Change and the Aggregate Production Function. *The Review of Economics and Statistics*. 1957. Vol. 39, No 3. P. 312–320.

29. Uzawa H. Models of Growth . The New Palgrave Dictionary of Economics. Macmillan Publishers Ltd. London: Palgrave Macmillan UK, 2018. P. 8885–8893

30. Varian Hal. Microeconomic Analysis (Third ed.). New York: Norton. 1992.

31. Walsh Carl. Monetary Theory and Policy (2nd ed.). Cambridge: MIT Press. 2003.

32. Wynn R. F., Holden K. An Introduction to Applied Econometric Analysis. New York: Halsted Press, 1974. pp. 62–65.

## References

1. Bilotserkivskiyi O.B., Shyriaieva N.V., Zamula O.O. Ekonomiko-matematyчне modeliuвання: Tekst leksii. Kharkiv: NTU «KhPI», 2010. 108 p. [in Ukrainian]

2. Vitlinskyi V.V. Modeliuвання ekonomiky: Navch. posibnyk. Kyiv: KNEU, 2003. 408 p. [in Ukrainian]

3. Vovk V.M., Zomchak L.M. Optyimizatsiini modeli ekonomiky Navch. posibnyk. Lviv: LNU imeni Ivana Franka, 2013. 318 p. [in Ukrainian]

4. Datsko M.V., Karbovnyk M.V. Doslidzhennia operatsii v ekonomitsi: navch. posib. Lviv: PAIS, 2009. 288 p. [in Ukrainian]

5. Ivashchuk O.T. Ekonomiko-matematyчне modeliuвання: Navchalnyi posibnyk. Ternopil: TNEU «Ekonomichna dumka», 2008. 704 p. [in Ukrainian]

6. Serediuk V.B. Zastosuvannia ekonomiko-matematychnykh metodiv dlia rozviazannia ekonomichnykh zadach. Visnyk sotsialno-ekonomichnykh doslidzhen. 2014. Vol. 1 (52). P.69-73. [in Ukrainian]

7. Iankovyi V.O. Ekonomiko-matematychni vlastyvoli vyrobnychoi funktsii Kobba-Duhlasa i CES-funktsii. Skhidna Yevropa: *Ekonomika, biznes ta upravlinnia*. 2017. Vol. 2 (07). P. 330-336. [in Ukrainian]

8. Aum Sangmin Why Is the LaborShare Declining? *Review*. 2020. Vol. 102 (4). P. 413-428. DOI: [10.20955/r.102.413-28](https://doi.org/10.20955/r.102.413-28)

9. Barro Robert J., Sala-i-Martin Xavier. Economic growth. The MIT Press, 2004. p. 29, fn. 7.

10. Berndt Ernst R., Christensen Laurits R. The Translog Function and the Substitution of Equipment, Structures, and Labor in U.S. manufacturing 1929–68. *Journal of Econometrics*. 1973. Vol. 1 (1). P. 81–113. DOI: [10.1016/0304-4076\(73\)90007-9](https://doi.org/10.1016/0304-4076(73)90007-9)

11. Boianovsky M. Modeling economic growth: Domar on moving equilibrium CHOPE *Working Paper*. 2015. No 10. DOI: [10.2139/ssrn.2664149](https://doi.org/10.2139/ssrn.2664149)

12. Brown Murray. "Cobb–Douglas Functions". The New Palgrave Dictionary of Economics. Palgrave Macmillan UK. 2017. P. 1–4. DOI: [10.1057/978-1-349-95121-5\\_480-2](https://doi.org/10.1057/978-1-349-95121-5_480-2)

13. Czerwinski A. Mathematics Serving Economics: A Historical Review of Mathematical Methods in Economics. *Symmetry*. 2024. Vol. 16(10), 1271. DOI: [10.3390/sym16101271](https://doi.org/10.3390/sym16101271)

14. Cobb C. W., Douglas, P. H. A Theory of Production. *American Economic Review*. 1928. Vol. 18. P. 139-165. JSTOR 1811556. Retrieved 26 September 2016.

15. Douglas Paul H. The Cobb-Douglas Production Function Once Again: Its History, Its Testing, and Some New Empirical Values. *Journal of Political Economy*, University of Chicago Press. 1976. Vol. 84(5). P. 903-915.
16. Elsby Michael, Hobijn Bart, Sahin Aysegül. The Decline of the U.S. Labor Share (Report). Federal Reserve Bank of San Francisco. Brookings Papers on Economic Activity, Fall 2013.
17. Filipe Jesus, Adams F. Gerard. The Estimation of the Cobb-Douglas Function: A Retrospective View. *Eastern Economic Journal*. 2005. Vol. 31 (3). P. 427-445.
18. Gechert Havranek, Irsova Kolcunova Measuring capital-labor substitution: The importance of method choices and publication bias. *Review of Economic Dynamics*. 2021. Vol. 45. P.55-82. DOI: [10.1016/j.red.2021.05.003](https://doi.org/10.1016/j.red.2021.05.003)
19. Hájková Dana, Hurník Jaromír. Cobb-Douglas Production Function: The Case of a Converging Economy. *Czech Journal of Economics and Finance (Finance a User)*. 2006. Vol. 57 (9-10) P. 465-476.
20. Hoch Irving. Simultaneous Equation Bias in the Context of the Cobb-Douglas Production Function. *Econometrica*. 1958. Vol. 26 (4). P. 566-578. DOI: [10.2307/1907517](https://doi.org/10.2307/1907517)
21. Houthakker H.S. The Pareto Distribution and the Cobb-Douglas Production Function in Activity Analysis. *The Review of Economic Studies*. 1955. Vol. 23 (1). P. 27-31. DOI: [10.2307/2296148](https://doi.org/10.2307/2296148)
22. Jacques Ian. Mathematics for Economics and Business (Ninth ed.). Harlow, United Kingdom: Pearson Education, 2018. 168 p.
23. Malcolm Pemberton and Nicholas Rau. Mathematics for economists: An introductory textbook, 4th ed. Manchester: Manchester University Press. 2015.
24. Nechyba Thomas J. Microeconomics : an intuitive approach with calculus (2nd ed.). Boston, MA: Cengage Learning. 2017. p. 126.
25. Silberberg Eugene, Suen, Wing. Elasticity of Substitution. The Structure of Economics: A Mathematical Analysis (Third ed.). Boston: Irwin McGraw-Hill. 2001. P. 246-247.
26. Smirnov R., Wang K. The Hamiltonian approach to the problem of derivation of production functions in economic growth theory. 2019. DOI: [10.48550/arXiv.1906.11224](https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.11224)
27. Solow R.M. A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*. 1956. Vol. 70. No 1. P. 65-94.
28. Solow R.M. Technical Change and the Aggregate Production Function. *The Review of Economics and Statistics*. 1957. Vol. 39, No 3. P. 312-320.
29. Uzawa H. Models of Growth . The New Palgrave Dictionary of Economics. Macmillan Publishers Ltd. London: Palgrave Macmillan UK, 2018. P. 8885-8893
30. Varian Hal. Microeconomic Analysis (Third ed.). New York: Norton, 1992.
31. Walsh Carl. Monetary Theory and Policy (2nd ed.). Cambridge: MIT Press. 2003.
32. Wynn R. F., Holden K. An Introduction to Applied Econometric Analysis. New York: Halsted Press. 1974. P. 62-65.

#### A CRITICAL REVIEW OF MATHEMATICAL MODELS OF ECONOMIC GROWTH

V. V. Kravtsiv, M. V. Martsinkiv, T. V. Vivchar

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University;  
57 Shevchenko St., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine;  
e-mail: [viktoria.kravtsiv@pnu.edu.ua](mailto:viktoria.kravtsiv@pnu.edu.ua),  
[maria.martsinkiv@pnu.edu.ua](mailto:maria.martsinkiv@pnu.edu.ua),  
[tetiana.vivchar.21@pnu.edu.ua](mailto:tetiana.vivchar.21@pnu.edu.ua)

УДК 517.98

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-114-120

## МУЛЬТИПЛІКАТИВНІ ФУНКЦІОНАЛИ НА ГІЛЬБЕРТОВИХ ПРОСТОРАХ СИМЕТРИЧНИХ АНАЛІТИЧНИХ ФУНКЦІЙ

А. В. Загороднюк<sup>1</sup>, О. М. Голубчак<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;  
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна;

<sup>2</sup>Івано-Франківський фаховий коледж Львівського національного університету  
природокористування; вул. Юності, 11, м. Івано-Франківськ, 76492, Україна;  
e-mail: [andriy.zagorodnyuk@pnu.edu.ua](mailto:andriy.zagorodnyuk@pnu.edu.ua), [oleggol@ukr.net](mailto:oleggol@ukr.net)

Досліджуються мультиплікативні лінійні функціонали на гільбертовому просторі симетричних аналітичних функцій на банаховому просторі всіх абсолютно сумовних послідовностей. Евклідову структуру на просторі симетричних поліномів можна отримати, якщо припустити, що всі степеневі поліноми ортогональні. Поповнення цього простору дає нам простір Гільберта симетричних аналітичних функцій. Лінійний функціонал є мультиплікативним, якщо він мультиплікативний на підпросторі симетричних поліномів, що розглядається як алгебра відносно поточкового множення. Тобто, лінійний мультиплікативний функціонал зберігає операції додавання і множення на підпросторі поліномів. Основною метою роботи є встановлення необхідних і достатніх умов неперервності лінійного мультиплікативного функціоналу на гільбертовому просторі симетричних аналітичних функцій за умови мультиплікативності гільбертової норми. Показано, що не існує мультиплікативної норми на гільбертовому просторі симетричних аналітичних функцій такої, що радіус рівномірної збіжності всіх функцій є нескінченним. Крім того, ми будемо приклад неперервного мультиплікативного функціоналу, який не є функціоналом значення в жодній точці. Знайдено необхідні і достатні умови неперервності лінійних мультиплікативних функціоналів на гільбертовому просторі симетричних аналітичних функцій. Порівняно мультиплікативні функціонали гільбертового простору симетричних аналітичних функцій із характеристиками алгебри симетричних аналітичних функцій обмеженого типу і виявлено, що множини цих функціоналів мають непорожній перетин, але не містять одна одну. Також, розглянуто детальніше мультиплікативні функціонали, які не є функціоналами значення в точках. Зокрема, показано, що будь-який функціонал значення в деякій точці можна подати у вигляді лінійної комбінації функціоналів спеціального вигляду.

**Ключові слова:** симетричні поліноми, симетричні аналітичні функції, спектр.

We investigate multiplicative linear functionals on a Hilbert space of symmetric analytic functions on the Banach space of all absolutely summing sequences. An Euclidian structure on the space of symmetric polynomials can be obtained if we suppose that all power polynomials are orthogonal. The completion of this space gives us a Hilbert space of symmetric analytic functions. A linear functional is multiplicative if it is multiplicative on the subspace of symmetric polynomials, which is considered algebra with respect to pointwise multiplication. That is, a linear multiplicative functional preserves the operations of addition and multiplication on the subspace of polynomials. It is shown that there is no multiplicative norm on the Hilbert space of symmetric analytic functions such that the radius of uniform convergence of all functions is infinite. The main goal of the paper is to establish necessary and sufficient conditions for the continuity of a linear multiplicative functional on the Hilbert space of symmetric analytic functions, providing that the Hilbert norm is multiplicative. Also, we construct an example of a continuous multiplicative functional that is not an evaluation at any point of the space. Necessary and sufficient conditions for the continuity of linear multiplicative functionals on the Hilbert space of symmetric analytic functions are found. We compare multiplicative functionals of the Hilbert space of symmetric analytic functions with characters of the algebra of symmetric analytic functions of bounded type and find out that the sets of these functionals have nonempty intersection but do not contain each other. Finally, we consider, more precisely, multiplicative functionals that are not point evaluations. In particular, we show that any point evaluation functional can be represented as a linear combination of functionals of special form.

**Keywords:** symmetric polynomials, symmetric analytic functions, spectrum.

### Вступ

Симетричні поліноми від багатьох комплексних змінних є класичним об'єктом алгебри і аналізу. Дослідження

симетричних поліномів на гільбертових просторах і, більш загально, на просторах  $l_1$  і  $L_p[0,1]$ ,  $1 < p < \infty$  розпочато у статті [1]. У цій статті, зокрема, дано означення

симетричних поліномів на даних просторах і наведено приклади. Також було доведено, що кожен симетричний поліном на гільбертовому просторі, просторах  $l_1$  і  $L_p[0,1], 1 < p < \infty$  виражається через алгебраїчну комбінацію елементарних симетричних поліномів. Пізніше вказані результати було узагальнено для інших просторів у працях М. Гонзалеса, Р. Гонзало, Х. Харамілло [2], Г. Галіндо, Т. Василичина, А. Загороднюка [3-4]. Алгебри симетричних поліномів та їх спектри досліджувались в [5]. В даній роботі досліджено гільбертові простори симетричних аналітичних функцій від нескінченної кількості змінних та функціонали, які діють в цих просторах. Основні відомості з теорії поліномів та аналітичних функцій на банахових просторах можна знайти в [6].

Функція  $f$  на нормованому просторі  $X$  з симетричним базисом називається симетричною, якщо вона інваріантна відносно довільної перестановки базисних векторів. Позначимо через  $P_s(X)$  алгебру всіх симетричних поліномів на нормованому просторі  $X$  з симетричним базисом. Послідовність  $\{Q_n\} \subset P_s(X)$  називається алгебраїчним базисом в  $P_s(X)$ , якщо вона алгебраїчно незалежна і для кожного  $P \in P_s(X)$  існує поліном від скінченної кількості змінних  $q(t_1, t_2, \dots, t_m)$  такий, що

$$P(x) = q(Q_1(x), Q_2(x), \dots, Q_m(x)), x \in X.$$

У цій статті ми розглядаємо випадок, коли  $X = l_1$  – простір абсолютно сумовних послідовностей, і  $P_n, n \in \mathbb{N}$  – алгебраїчний базис степеневих симетричних поліномів на  $l_1$ ,

$$P_n(x) = P_n((x_1, x_2, \dots)) = \sum_{k=1}^{\infty} x_k^n.$$

Нехай  $\lambda(\lambda_1, \dots, \lambda_m)$  – розбиття деякого натурального числа  $n$  на натуральні

доданки  $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ . Тобто,  $|\lambda| = \lambda_1 + \dots + \lambda_m = n$ . Ми будемо використовувати позначення  $P_\lambda = P_{\lambda_1} \dots P_{\lambda_m}$ . Відомо (див. [7]), що поліноми  $P_\lambda$  утворюють лінійний базис в алгебрі  $P_s(X)$ .

На  $P_s(X)$  можна ввести структуру евклідового простору за допомогою наступного скалярного добутку:  $\langle P_\lambda, P_\mu \rangle = b_{\lambda\mu} \delta_{\lambda\mu}$ , де  $\delta_{\lambda\mu}$  – символ Кронекера,  $b_\lambda > 0$ . Даний скалярний добуток породжує норму

$$\|P_\lambda\| = \sqrt{\langle P_\lambda, P_\lambda \rangle} = \sqrt{b_\lambda}.$$

Поповнення простору  $P_s(l_1)$  відносно даної норми для випадку  $b_\lambda = 1$  будемо позначати  $H_s(l_1)$ , а в загальному випадку  $H_s^b(l_1)$  – гільбертів простір симетричних функцій на  $l_1$  з вагою  $b = \{b_\lambda\}_\lambda$ .

Очевидно, що значення в точці  $x \in l_1$  породжує функціонал  $\delta_x : P \mapsto P(x)$ ,  $P \in P_s(l_1)$ .

### Основні результати

Легко бачити,  $H_s^b(l_1)$  не є алгеброю відносно поточкового множення. Проте, добуток двох поліномів з  $H_s^b(l_1)$  належить  $H_s^b(l_1)$ .

### Означення 1

Лінійний функціонал  $\varphi : H_s^b(l_1) \rightarrow \mathbb{C}$  називається мультиплікативним, якщо  $\varphi(PQ) = \varphi(P)\varphi(Q)$  для всіх поліномів  $P, Q \in H_s^b(l_1)$ . Аналогічно, лінійний оператор  $\Phi : H_s^b(l_1) \rightarrow H_s^b(l_1)$  називається мультиплікативним, якщо  $\Phi(PQ) = \Phi(P)\Phi(Q)$  для всіх поліномів  $P, Q \in H_s^b(l_1)$ .

Оскільки ортонормований базис простору  $H_s^b(l_1)$  утворюють скінченні добутки поліномів  $P_k$ , то кожен мультиплікативний функціонал  $\varphi$  на

$H_s^b(\ell_1)$  повністю визначається своїми значеннями на  $P_k, k=1,2,\dots$ . Навпаки, поклавши  $\varphi(P_k) = a_k$  для деякої послідовності чисел  $a_k$ , ми можемо однозначно продовжити за лінійністю і мультиплікативністю  $\varphi$  до лінійного мультиплікативного функціонала на щільний підпростір  $P_s(\ell_1) \subset H_s^b(\ell_1)$ . Якщо при цьому функціонал  $\varphi$  буде обмеженим, а отже, неперервним, то його можна продовжити за неперервністю на  $H_s^b(\ell_1)$ . Таким чином, задача опису множини  $M(H_s^b(\ell_1))$  лінійних мультиплікативних функціоналів на  $H_s^b(\ell_1)$  зводиться до опису множини послідовностей  $a_k$ , для яких функціонал  $\varphi(P_k) = a_k$  буде обмеженим на  $P_s^b(\ell_1)$ .

### Лема 2

Припустимо, що на  $H_s^b(\ell_1)$  задано мультиплікативну норму. Тоді лінійний мультиплікативний функціонал  $\varphi$  на підпросторі поліномів  $P_s^b(\ell_1) \subset H_s^b(\ell_1)$  буде обмеженим тоді і тільки тоді, коли для послідовності значень  $a_k = \varphi(P_k), k \in \mathbb{N}$  множина

$$\left\{ \frac{a_\lambda}{\sqrt{b_\lambda}} = \frac{a_{\lambda_1} \cdots a_{\lambda_n}}{\sqrt{b_\lambda}} : |\lambda| = \lambda_1 + \cdots + \lambda_n \in \mathbb{N} \right\}$$

є абсолютно сумовною в квадраті. В цьому випадку

$$\|\varphi\|^2 = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\lambda_1 + \cdots + \lambda_n = n} \frac{|a_{\lambda_1} \cdots a_{\lambda_n}|^2}{b_\lambda}.$$

### Доведення

Нехай  $f$  – довільний елемент з  $H_s^b(\ell_1)$ . За означенням простору  $H_s^b(\ell_1)$ ,  $f$  можна подати у вигляді

$$f = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{|\lambda|=n} c_\lambda P_\lambda,$$

де  $\|f\|^2 = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{|\lambda|=n} |c_\lambda|^2 b_\lambda < \infty$ .

Припустимо, що  $\varphi \in M(H_s^b(\ell_1))$ . Тоді

$$\varphi(f) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{|\lambda|=n} c_\lambda \varphi(P_\lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{|\lambda|=n} c_\lambda a_\lambda < \infty.$$

З того, що  $\varphi(P_\lambda) = a_\lambda$  випливає, що

$$\varphi = \left\langle \cdot, \left| \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{|\lambda|=n} \frac{a_\lambda P_\lambda}{|P_\lambda|^2} \right\rangle = \left\langle \cdot, \left| \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{|\lambda|=n} \frac{a_\lambda P_\lambda}{b_\lambda} \right\rangle. \right. \quad (1)$$

Тому

$$\|\varphi\|^2 = \varphi|\varphi = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\lambda_1 + \cdots + \lambda_n = n} \frac{|a_{\lambda_1} \cdots a_{\lambda_n}|^2}{b_\lambda}.$$

Навпаки, якщо

$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\lambda_1 + \cdots + \lambda_n = n} \frac{|a_{\lambda_1} \cdots a_{\lambda_n}|^2}{b_\lambda} < \infty,$$

то формула (1) визначає функціонал

$$\varphi(f) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\lambda_1 + \cdots + \lambda_n = n} c_\lambda \varphi(P_\lambda)$$

кожної функції  $f \in H_s^b(\ell_1)$  і

$$\|\varphi\|^2 = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\lambda_1 + \cdots + \lambda_n = n} \frac{|a_{\lambda_1} \cdots a_{\lambda_n}|^2}{b_\lambda}.$$

### Означення 3

Скажемо, що норма простору  $H_s^b(\ell_1)$  субмультиплікативна, якщо існує константа  $C > 0$ , яка не залежить від  $\lambda$  така, що  $C \|P_\lambda P_\mu\| \geq \|P_\lambda\| \|P_\mu\|$  для довільних розбиттів  $\lambda, \mu$ . У випадку, якщо  $\|P_\lambda P_\mu\| = \|P_\lambda\| \|P_\mu\|$  для довільних розбиттів  $\lambda, \mu$ , норма простору  $H_s^b(\ell_1)$  буде називатись мультиплікативною.

Очевидно, що норма простору  $H_s^b(\ell_1)$  є мультиплікативною тоді і тільки тоді, коли для довільного розбиття  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ ,  $b_\lambda = b_{\lambda_1} \cdots b_{\lambda_n}$ . Випадок  $b_\lambda \equiv 1$  є, звичайно, прикладом мультиплікативної норми. Легко бачити,

що випадок  $b_\lambda = z_\lambda$  визначає субмультиплікативну але не мультиплікативну норму, де

$$z_\lambda = \prod_{r \geq 1} (r^{m_r} m_r!),$$

де  $r$  та  $m_r$  визначені із зображення  $\lambda$  у вигляді

$$\lambda = (1^{m_1}, 2^{m_2}, \dots, r^{m_r}, \dots).$$

Проте, формула

$$b_\lambda = \frac{z_\lambda}{\prod_{z \geq 1} m_z!} = \prod_{z \geq 1} r^{m_r}$$

визначає мультиплікативну норму на  $H_s^b(\ell_1)$ . Зауважимо, що не існує мультиплікативної норми на  $H_s^b(\ell_1)$  такої, що радіус рівномірної збіжності всіх функцій з  $H_s^b(\ell_1)$  є нескінченним. Справді, нехай  $\|P_1\| = c > 0$ . З мультиплікативності норми випливає, що

$$\|P_1^n\| = \sqrt{b_{(1, \dots, 1)}} = \sqrt{c^n}.$$

Тому, радіус рівномірної збіжності  $r$  функцій з  $H_s^b(\ell_1)$  не перевищує  $\sqrt{c}$ .

Позначимо

$$\mathbb{D}_2^b = \{a_k : (a_k / \sqrt{b_{\lambda_k}}) \in \ell_2, |a_k| < \sqrt{b_{\lambda_k}}\}.$$

Для випадку мультиплікативної норми маємо наступну теорему.

#### Теорема 4

Припустимо, що на  $H_s^b(\ell_1)$  задано мультиплікативну норму. Лінійний мультиплікативний функціонал  $\varphi$  на  $P_s(\ell_1)$  буде неперервним тоді і тільки тоді, коли послідовність  $a = \{a_k = \varphi(P_k)\}$  належить  $\mathbb{D}_2^b$ .

#### Доведення

Нехай  $|a_k| < \sqrt{b_{\lambda_k}}$ . Тоді  $|a_k| / \sqrt{b_{\lambda_k}} < 1$ .

Тому

$$\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\lambda_1 + \dots + \lambda_n = n} \frac{|a_{\lambda_1} \dots a_{\lambda_n}|^2}{b_{\lambda_1} \dots b_{\lambda_n}} = \prod_{k=1}^{\infty} \frac{1}{1 - |a_k|^2 (b_{\lambda_k})^{-1}}.$$

Цей добуток праворуч збігається, оскільки прологарифмувавши, отримаємо

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left| -\log \frac{1}{1 - |a_k|^2 (b_{\lambda_k})^{-1}} \right| \leq \sum_{k=1}^{\infty} |a_k|^2 b_{\lambda_k} = \|(a_k (\sqrt{b_{\lambda_k}})^{-1})\|^2.$$

для деякої константи  $c$ .

Таким чином, з того, що послідовність  $(a_k / \sqrt{b_{\lambda_k}}) \in \ell_2$ , за лемою 2, маємо

$$\begin{aligned} \|\varphi\|^2 &= \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\lambda_1 + \dots + \lambda_n = n} \frac{|a_{\lambda_1} \dots a_{\lambda_n}|^2}{b_{\lambda_1} \dots b_{\lambda_n}} \\ &= \prod_{k=1}^{\infty} \frac{1}{1 - |a_k|^2 (b_{\lambda_k})^{-1}} \leq e^{\|(a_k / \sqrt{b_{\lambda_k}})\|^2} \end{aligned}$$

і, отже,  $\varphi$  – обмежений функціонал.

Навпаки, якщо  $\varphi$  – обмежений функціонал, то

$$\sum_{k=1}^{\infty} |a_k|^2 / b_{\lambda_k} \leq \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\lambda_1 + \dots + \lambda_n = n} \frac{|a_{\lambda_1} \dots a_{\lambda_n}|^2}{b_{\lambda_1} \dots b_{\lambda_n}} = \|\varphi\|^2.$$

Тому послідовність  $(a_k / \sqrt{b_{\lambda_k}}) \in \ell_2$ .

Припустимо, що для деякого  $k$ ,  $|a_k| / \sqrt{b_{\lambda_k}} \geq 1$ . Розглянемо елемент  $f \in H_s^b(\ell_1)$  вигляду

$$f = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{P_k^m}{(b_{\lambda_k})^{m/2} m}.$$

Очевидно, що

$$\|f\|^2 = \left| \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \right| < \infty.$$

Тоді

$$\varphi(f) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{a_k^m}{m (b_{\lambda_k})^{m/2}} = \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{a_k}{\sqrt{b_{\lambda_k}}} \right)^m \frac{1}{m} = \infty,$$

тобто в цьому випадку  $\varphi$  не визначений на  $H_s^b(\ell_1)$ . Отже,  $|a_k| < 1$  для кожного  $k$ , тобто  $a \in \mathbb{D}_2^b$ .

Зауважимо, що функціонал значення в точці  $\delta_x(f) = f(x), f \in H_s(\ell_1)$  буде неперервним мультиплікативним функціоналом тоді і тільки тоді, коли

$$x \in \Omega = \{x \in \ell_1 : |P_k(x)| < 1, k \in \mathbb{N}\}.$$

Таким чином, якщо  $\varphi = \delta_x$  для деякого  $x \in \ell_1$  і

$$|a_k| = |\varphi(P_k)| = |P_k(x)| < 1, \text{ то } a = \{a_k\}$$

автоматично належить множині  $\mathbb{D}_2 \subset \ell_2$ .

Покажемо, що існують елементи з  $M(H_s(\ell_1))$ , які не є функціоналами значення в точці.

**Приклад 5**

Розглянемо скінченну послідовність  $\{a_1, \dots, a_m : |a_i| < 1\}$ , для якої не всі  $a_i = 0$ .

За теоремою 4, для будь-якої такої послідовності існує такий функціонал  $\varphi \in M(H_s(\ell_1))$  такий, що  $\varphi(P_k) = a_k, 1 \leq k \leq m$  і  $\varphi(P_k) = 0, k > m$ . З роботи [8] відомо, що не існує елемента  $x \in \ell_1$ , для якого  $\varphi(P_k) = \delta_x(P_k)$  для всіх  $k$ . Тому,  $\varphi$  не є функціоналом значення в точці.

**Приклад 6**

Нехай  $z = \{z_n : |z_n| < 1, \forall n \in \mathbb{N}\}$  – деяка обмежена послідовність така, що для деякого  $m \in \mathbb{N}$

$$\sum_{n=1}^{\infty} |z_n|^{m+1} < \infty \quad \text{і} \quad \sum_{n=1}^{\infty} z_n^k$$

збігається умовно (але не абсолютно) для всіх  $k \leq m$ . Тоді

$$P_k(z) := \sum_{n=1}^{\infty} z_n^k$$

є визначені для всіх  $k \in \mathbb{N}$  і  $\{a_k\} = \{P_k(z)\} \in \ell_2$ . Тому, існує функціонал  $\varphi \in M(H_s(\ell_1))$  такий, що  $\varphi(P_k) = P_k(z)$ . Але  $z \notin \ell_1$ , тому  $\varphi$  не є функціоналом значення в точці.

Позначимо через  $\mathcal{H}_s$  простір  $H_s^b(\ell_1)$  для випадку  $b_\lambda \geq |\lambda|!$ . Відомо, що  $\mathcal{H}_s$  – щільний підпростір в алгебрі симетричних аналітичних функцій обмеженого типу  $H_{bs}(\ell_1)$  на  $\ell_1$  (див. [5]).

Таким чином, кожен характер алгебри  $H_{bs}(\ell_1)$  буде лінійним мультиплікативним функціоналом на  $\mathcal{H}_s$ . Зокрема, серед характерів  $H_{bs}(\ell_1)$  є однопараметрична сім'я  $\psi_s, s \in \mathbb{C}$  така, що

$$\psi_s(P) = \lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\underbrace{\frac{s}{n}, \frac{s}{n}, \dots, \frac{s}{n}}_n, 0, 0, \dots\right).$$

При цьому  $\psi_s(P_1) = s$  і  $\psi_s(P_k) = 0$  для  $k > 1$ . Очевидно, що функціонал  $\psi_s$  на  $\mathcal{H}_s$  має вигляд  $\psi_s(f) = f | sP_1$ .

$$\text{В подібний спосіб } \psi_{s,k}(f) = \frac{f | sP_k}{\|P_k\|^2}$$

можна задати мультиплікативні функціонали на  $\mathcal{H}_s$  такі, що  $\psi_{s,k}(P_n) = s\delta_{kn}$  для достатньо малих  $s$  (див. наступне твердження). Проте, функціонали  $\psi_{s,k}$  вже не будуть неперервними в топології простору  $H_{bs}(\ell_1)$  [5]. Тобто, не всі мультиплікативні функціонали на просторі  $\mathcal{H}_s$  продовжуються до характерів алгебри  $H_{bs}(\ell_1)$ .

Аналоги функціоналів  $\psi_{s,k}$  існують для широкого класу просторів  $H_s^b(\ell_1)$ .

**Лема 7**

На просторі  $H_s^b(\ell_1)$  з субмультиплікативною нормою  $\|\cdot\|$  існує мультиплікативна гільбертова норма  $\|\|\cdot\|\|$ , неперервна відносно  $\|\cdot\|$  і базис  $\{P_\lambda\}$  буде ортогональним у  $(H_s^b(\ell_1), \|\|\cdot\|\|)$ .

**Доведення**

Для того, щоб визначити норму на гільбертовому просторі, достатньо її визначити на ортогональному базисі  $\{P_\lambda\}$ .

Покладемо  $\| \| P_k \| \| = \| P_k \|$ ,  $k \in \mathbb{N}$  і якщо  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_m)$ , то

$$\| \| P_\lambda \| \| := \| P_{\lambda_1} \| \cdots \| P_{\lambda_m} \|.$$

Таким чином, умова мультиплікативності для норми  $\| \| \cdot \| \|$  виконується. Покажемо, що ця норма є неперервною відносно  $\| \cdot \|$  і коректно визначеною на всьому просторі.

З умови ортогональності  $\{P_\lambda\}$  і умови субмультиплікативності, для довільної скінченної суми  $\sum_{\lambda} c_\lambda P_\lambda \in H_s^b(\ell_1)$  маємо:

$$\begin{aligned} \| \| \sum_{\lambda} c_\lambda P_\lambda \| \|^2 &= \sum_{\lambda} |c_\lambda|^2 \| \| P_\lambda \| \|^2 = \\ &= \sum_{\lambda=(\lambda_1, \dots, \lambda_m)} |c_\lambda|^2 \| P_{\lambda_1} \|^2 \cdots \| P_{\lambda_m} \|^2 \\ &\leq C \sum_{\lambda=(\lambda_1, \dots, \lambda_m)} |c_\lambda|^2 \| P_{\lambda_1} \cdots P_{\lambda_m} \|^2 = \\ &= C \| \| \sum_{\lambda} c_\lambda P_\lambda \| \|^2 \end{aligned}$$

для деякої константи  $C > 0$ . Отже, норма  $\| \| \cdot \| \|$  є обмеженою, а тому неперервною відносно норми  $\| \cdot \|$  і, тому буде коректно визначеною на всьому просторі  $H_s^b(\ell_1)$ .

### Твердження 8

У просторі  $H_s^b(\ell_1)$  з субмультиплікативною нормою існують неперервні мультиплікативні функціонали  $\Psi_{s,k}$ ,  $\Psi_{s,k}(P_n) = s\delta_{kn}$  для тих і тільки тих комплексних чисел  $s$ , які задовольняють нерівність  $|s| < \sqrt{b_{\lambda_k}} = \| P_k \|$ .

Якщо норма  $H_s^b(\ell_1)$  субмультиплікативна, то функціонали  $\Psi_{s,k}$  для  $|s| < \sqrt{b_{\lambda_k}}$  будуть неперервними.

### Доведення

Нехай норма простору  $H_s^b(\ell_1)$  – мультиплікативна. За теоремою 4 мультиплікативний функціонал  $\Psi_{s,k}$  буде неперервним тоді і тільки тоді, коли

$|s| = |\Psi_{s,k}(P_k)| < b_{\lambda_k}$ . В загальному випадку, субмультиплікативної норми, за лемою 7 на  $H_s^b(\ell_1)$  існує неперервна мультиплікативна норма  $\| \| \cdot \| \|$ . За доведеним вище, функціонали  $\Psi_{s,k}$  є обмеженими відносно цієї норми. Тому вони будуть обмеженими і відносно норми  $\| \cdot \|$ .

Позначимо  $\Psi_k := \sqrt{b_k} \Psi_{1,k} = \| P_k \| \Psi_{1,k}$ ,  $k \in \mathbb{N}$ . Тоді

$$\| \Psi_k \| = \Psi_k \left( \frac{P_k}{\| P_k \|} \right) = 1$$

і функціонали  $\{\Psi_k\}$  є попарно ортогональними в просторі лінійних неперервних функціоналів на  $H_s^b(\ell_1)$ . Позначимо  $E_b$  – замкнену лінійну оболонку функціоналів  $\Psi_k$ ,  $k \in \mathbb{N}$ .

### Твердження 9

Для кожного  $x \in \Omega_b$  функціонал  $\delta_x \in E_b$ .

### Доведення

Оскільки функціонали  $\Psi_k$  біортогональні до поліномів  $\frac{P_k}{\| P_k \|}$ , то

$$\delta_x, \Psi_k = \delta_x \left( \frac{P_k}{\| P_k \|} \right) = \frac{P_k(x)}{\| P_k \|}.$$

Тому функціонал  $\delta_x$  повністю визначається послідовністю  $\{\delta_x, \Psi_k\}$  і, оскільки  $\delta_x$  мультиплікативний, то за теоремою 4

$$|\delta_x(P_k)| = |P_k(x)| \leq \sqrt{b_k} = \| P_k \|.$$

Таким чином, поклавши  $a_k = P_k(x)$ , за лемою 2 маємо

$$\left\| \sum_{k=1}^{\infty} \delta_x, \Psi_k \Psi_k \right\|^2 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{|P_k(x)|^2}{\| P_k \|^2} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{|a_k|^2}{b_k} < \infty.$$

Отже, елемент  $\delta_x = \sum_{k=1}^{\infty} \delta_x, \Psi_k \Psi_k$  належить простору  $E_b$ .

Список використаних джерел /  
 References

1. Nemirovskii A. S., Semenov S. M. On Polynomial Approximation of Functions on Hilbert Space. *Math. USSR-Sb.* 1973. Vol. 21(2). P. 255–277. DOI: [10.1070/SM1973v021n02ABEH002016](https://doi.org/10.1070/SM1973v021n02ABEH002016)
2. Gonzalez M., Gonzalo R., Jaramillo J. Symmetric polynomials on rearrangement invariant function spaces. *Jour. London Math. Soc.* 1999. Vol. 59 P. 681–697. DOI: [10.1112/S0024610799007164](https://doi.org/10.1112/S0024610799007164)
3. Galindo P., Vasylyshyn T., Zagorodnyuk A. Analytic structure on the spectrum of the algebra of symmetric analytic functions on  $L_\infty$ . *RACSAM.* 2020. Vol. 114(56). 13 p. DOI: [10.1007/s13398-020-00791-w](https://doi.org/10.1007/s13398-020-00791-w)
4. Vasylyshyn, T. Symmetric analytic functions on the Cartesian power of the complex Banach space of Lebesgue measurable essentially bounded functions on  $[0, 1]$ . *J. Math. Anal. Appl.* 2022. Vol. 509. Iss. 2. 125977. DOI: [10.1016/j.jmaa.2021.125977](https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2021.125977)
5. Chernega I., Galindo P., Zagorodnyuk A. Some algebras of symmetric analytic functions and their spectra. *Proc. Amer. Math. Soc.* 2012. Vol. 55. P.125-142. DOI: [10.1017/S0013091509001655](https://doi.org/10.1017/S0013091509001655)
6. Mujica J. Complex Analysis in Banach Spaces. North-Holland, Amsterdam, New York, Oxford. 1986. 434 p.
7. Macdonald I. G. Symmetric Functions and Orthogonal Polynomials. University lecture series. Providence, American Mathematical Society. 1997. 64 p.
8. Alencar R., Aron R., Galindo P., Zagorodnyuk A. Algebra of symmetric holomorphic functions on  $\ell_p$ . *Bull. Lond. Math. Soc.* 2003. Vol. 35. P. 55-64. DOI: [10.1112/S0024609302001431](https://doi.org/10.1112/S0024609302001431)

MULTIPLICATIVE FUNCTIONS ON  
 HILBERT SPACES OF SYMMETRIC  
 ANALYTIC FUNCTIONS

A. V. Zagorodniuk, O. M. Holubchak

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University;  
 57 Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine;  
 Ivano-Frankivsk College at the  
 Lviv National Agrarian University,  
 11 Ynosti Str., Ivano-Frankivsk, Ukraine;  
 e-mail: [andriy.zagorodnyuk@pnu.edu.ua](mailto:andriy.zagorodnyuk@pnu.edu.ua),  
[oleggol@ukr.net](mailto:oleggol@ukr.net)

## КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

УДК 004.75:654.9

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-121-129

### СИСТЕМА ДАЛЬНЬОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ДАТЧИКІВ НА ОСНОВІ ОДНОПЛАТНИХ МІКРОКОМП'ЮТЕРІВ З LoRa

*Д. В. Варанкін, І. М. Журавська, К. О. Обухова*

*Чорноморський національний університет імені Петра Могили;  
вул. 68 Десантників 10, м. Миколаїв, 54000, Україна; e-mail: varankin.d@chmnu.edu.ua,  
iryna.zhuravska@chmnu.edu.ua, katelyna.obukhova@chmnu.edu.ua*

Стаття присвячена обґрунтування можливості використання системи дальнього радіозв'язку, заснованої на технології LoRa та одноплатних мікрокомп'ютерах, для моніторингу та контролю датчиків. У роботі розглянуто архітектуру мереж LoRaWAN, їх переваги, зокрема енергоефективність, великий радіус дії та високу надійність передачі даних. Проаналізовано особливості бездротового зв'язку за технологією LoRa, включаючи роботу в неліцензованих ISM-діапазонах та використання методів модуляції, таких як CSS (Chirp Spread Spectrum), що забезпечує стабільний зв'язок на великих відстанях із низьким енергоспоживанням. У межах дослідження проведено серію експериментів з метою оцінки працездатності системи в реальних умовах, зокрема у важкодоступних місцях та на великих відстанях. Результати тестування показали ефективність системи на відстанях до 7 км із мінімальними втратами даних, однак при збільшенні відстані до 14 км спостерігалися затримки та втрати пакетів. Запропоновано вдосконалення методу передачі даних для покращення продуктивності на великих відстанях при підвищеній потужності передавача та використанні ємніших акумуляторів. Також розглянуто варіанти підвищення продуктивності системи, зокрема збільшення потужності передавачів, використання антен із кращими характеристиками та впровадження енергоефективних технологій. Результати дослідження демонструють придатність системи для використання в реальних умовах з дальністю бездротового сигналу 3–14 км із можливістю оптимізації розроблюваного апаратно-програмного рішення для великих відстаней без втрати якості сигналу. Розроблена система придатна для застосування в галузях, що потребують віддаленого моніторингу, таких як сільське господарство, промислові об'єкти та інтелектуальні міські системи.

Ключові слова: LoRa, LPWAN, бездротовий зв'язок, комп'ютерна мережа, Інтернет речей (IoT), одноплатний мікрокомп'ютер, дальній радіозв'язок, маршрутизація, енергоефективність.

The article is dedicated to the justification of the possibility of the use of a long-range radio communication system based on LoRa technology and single-board microcomputers for monitoring and controlling sensors. The paper considers the architecture of LoRaWAN networks, their advantages, in particular, energy efficiency, a large range and high reliability of data transmission. The features of LoRa wireless communication are analyzed, including operation in unlicensed ISM bands and the use of modulation methods such as CSS (Chirp Spread Spectrum), which provides stable communication over long distances with low power consumption. The study includes a series of experiments to evaluate the system's performance in real-world conditions, in particular in hard-to-reach locations and over long distances. The test results demonstrated system effectiveness at distance up to 7 km with minimal data loss, although delays and packet losses occurred when the distance increased to 14 km. An improvement of the data transmission method is proposed to improve performance over long distances with increased transmitter power and the use of larger-capacity batteries. Options for increasing system performance are also considered, in particular, increasing transmitter power, using antennas with better characteristics, and implementing energy-efficient technologies. The research results demonstrate the system's suitability for use in real-world conditions with a wireless signal range of 3–14 km, with the possibility of optimizing the developed hardware and software solution for long distances without loss of signal quality. The developed system is suitable for use in industries requiring remote monitoring, such as agriculture, industrial facilities, and intelligent city systems.

Keywords: LoRa, LPWAN, wireless communication, computer network, Internet of Things (IoT), single-board microcomputer, long-range radio communication, routing, energy efficiency.

### Вступ

У сучасному світі, з розвитком технологій Інтернету Речей (IoT), зростає потреба в ефективних та надійних системах радіозв'язку для моніторингу та контролю різноманітних датчиків. Системи дальнього радіозв'язку, зокрема на основі технології LoRa (Long Range), забезпечують широкий діапазон покриття, низьке енергоспоживання та високу надійність передачі даних, що робить їх ідеальними для застосувань у віддалених та важкодоступних місцях.

Завдяки топології типу «зірка», у якій кінцеві пристрої безпосередньо спілкуються зі шлюзами, технології LoRa можуть зменшити енергетичні витрати на роботу датчиків, що, в свою чергу, продовжує термін їхньої служби. Це особливо важливо для систем, які потребують тривалого автономного функціонування без частого обслуговування.

Впровадження одноплатних мікрокомп'ютерів у дані системи дозволяє створити універсальні рішення для контролю та управління датчиками, забезпечуючи інтеграцію різноманітних функцій, таких як геолокація, обробка даних та управління пристроями.

Використання одноплатних мікрокомп'ютерів, поряд з технологією LoRa, дозволяє створити гнучкі та масштабовані системи, які можуть задовольняти вимогам сучасних користувачів, мінімізуючи енергоспоживання і оптимізуючи витрати.

### Формулювання цілей статті

Метою даної статті є вдосконалення систем контролю та автоматизації у різних галузях за допомогою віддаленого моніторингу та бездротових каналів зв'язку. Для досягнення цієї мети передбачається розроблення енергоефективної системи передачі даних на основі технології LoRa. Визначено завдання з аналізу сучасних підходів, вибору оптимальної архітектури системи, реалізації та тестування апаратно-програмного забезпечення задля надійного зв'язку на великих відстанях.

### Основний текст статті

Для передавання даних на великі відстані, використовуючи малу потужність, із сучасних технологій бездротового зв'язку найбільш придатною можна вважати технологію LoRa. Це працює завдяки фізичним законам, які стверджують, що для передачі даних на далекі відстані потрібно або збільшити потужність, або зменшити пропускну здатність. LoRaWAN (Long-Range Wide Area Network) – це тип технології бездротового зв'язку для передачі даних на великі відстані. Вона створена для забезпечення низькошвидкісного збирання даних між підключеними сенсорами, що відстежують і передають інформацію [1].

Існує кілька інших типів подібних мереж, таких як LPWAN (мережа з низьким енергоспоживанням для широкої зони покриття), LPWA (мережа з низьким енергоспоживанням для широкої зони) або LPN (мережа з низьким енергоспоживанням).

LoRa працює на радіочастотах у діапазонах, що не вимагають ліцензії, таких як 169 МГц, 433 МГц, 868 МГц (Європа) і 915 МГц (Північна Америка). LoRa забезпечує передачу на дуже великі відстані (більше 10 км у сільських районах) при низькому енергоспоживанні. Технологія складається з двох частин: LoRa – фізичний рівень, і протокол зв'язку, побудований на базі цього фізичного рівня LoRa. Комунікаційний рівень представлений WAN (Wide Area Network) – відкритим протоколом зв'язку, який визначається консорціумом LoRa Alliance.

Отже, LoRaWAN визначає протокол зв'язку та архітектуру системи для мережі, тоді як фізичний рівень LoRa забезпечує довготривалий зв'язок. Протокол зв'язку LoRaWAN гарантує надійну та безпечну передачу даних.

Мережі LoRaWAN можуть бути побудовані за різними топологіями. Найбільше розповсюдження мають коміркова (англ. mesh) та зірка. Згідно з [2], LoRaWAN має три класи кінцевих пристроїв, які відповідають різним вимогам:

– клас А: передача даних ініціюється кінцевим пристроєм й завжди асинхронна. Передача даних на пристрій завжди відбувається після відправки даних з пристрою. Цей клас є найбільш енергоефективним;

– клас В: відповідно з класом А, періодично виконуються запити з метою отримання даних на пристрій;

– клас С: завжди прослуховує лінію зв'язку. Придатний для пристроїв з постійним джерелом енергії, оскільки має високий ступінь енергоживлення.

Безпека передачі даних у LoRaWAN забезпечується використанням шифрування AES-128. Для захисту даних використовуються два типи ключів: сесійний ключ для зв'язку з шлюзом (NwkSKey) і ключ застосунку (AppSKey), що використовується для шифрування на рівні додатків.

Архітектура LoRaWAN базується на топології «зірка», що дозволяє шлюзам отримувати дані від усіх пристроїв у зоні покриття. Передача сигналів відбувається за допомогою LoRa-транспондерів, які можуть бути оснащені мікроконтролерами. Термін служби батарей сенсорів складає від 2 до 5 років, залежно від класу пристрою та інтенсивності використання.

LoRaWAN є однією з провідних LPWAN-технологій, що ідеально застосована у сільському господарстві, автоматизації будинків, промислових системах та IoT-проектах, які вимагають низького енергоспоживання та стабільної роботи на великих відстанях.

Вузли можуть належати до трьох класів (А, В, С), залежно від потреб у енергоспоживанні та режиму передачі даних [3]. Клас А є найбільш енергоефективним, тоді як клас С забезпечує постійне прослуховування мережі. Термін служби батарей у вузлах зазвичай становить від 2 до 5 років, а дальність передачі варіюється від 1 до 10 кілометрів [2].

Витрати на енергію для датчиків, які використовують 4G-картки, будуть значними, що вимагатиме їхньої

підзарядки не рідше одного разу на місяць. При цьому, порівняння вартості послуг різних 4G-провайдерів для таких датчиків становитиме від 75 грн на місяць (провайдер № 1) до 400 грн (провайдер № 2). У той же час, використання мережі SigFox (LPWAN-провайдера) обійдеться від 7 до 50 грн на місяць, навіть за умови міжнародного використання датчика.

Самостійно можна побудувати лише мережу формату LoRaWAN, оскільки це єдиний формат мовлення в діапазонах, що не ліцензуються. Одна зона покриття складатиметься з LoRaWAN – шлюза та маршрутизатора.

LoRaWAN має кілька ключових переваг, які роблять його кращим вибором у порівнянні з SigFox та NB-IoT. По-перше, LoRaWAN працює в безкоштовних ISM-діапазонах (868 МГц – в Європі та 915 МГц – у США), що усуває витрати на ліцензування, які є характерними для NB-IoT. Це також надає більшу гнучкість в налаштуванні, оскільки не потрібно отримувати ліцензію для пристроїв [4].

Термін автономної роботи LoRaWAN перевищує 10 років, що є важливим фактором для IoT-датчиків, адже довговічність дозволяє зменшити частоту заміни батарей. Вартість підключення до LoRaWAN, як правило, нижча порівняно з 4G та NB-IoT, що робить його економічно вигідним вибором, особливо для LPWAN-рішень.

Мережа LoRa Mesh також спроектована для економії енергії, оскільки пристрої можуть переходити в режим глибокого сну і автоматично прокидатися, коли є дані для передачі. Це допомагає подовжити термін служби батарей і знизити витрати на їх заміну. Мережа LoRa Mesh має безліч застосувань у різних сферах, включаючи моніторинг і управління тваринами, контроль за пристроями розумного дому, управління енергією в енергетичних системах тощо [5].

Чирпована хвиля (англ. «chirp wave») – це форма хвильового сигналу, в якій несуча частота змінюється з часом в межах

Таблиця 1 – Порівняння малопотужних бездротових технологій

Критерій	Chirp (CSS)	UWB	BLE	Wi-Fi
Точність локалізації, м	1,0–2,0	+/- 0,4	< 5,0	< 10,0
Діапазон, м	Оптимальний: 10–500 Макс: 1000	Оптимальний: 0–50 Макс: 200	Оптимальний: 0–25 Макс: 100	Оптимальний: 0–50 Макс: 500
Затримка, с	< 0,001	< 0,001	3–5	3–5
Споживання енергії	Дуже низьке, для портативних пристроїв	Низьке, для портативних пристроїв	Дуже низьке, для портативних пристроїв	Середнє
Вартість	\$	\$\$	\$\$	\$\$\$
Частотний діапазон, ГГц	ISM: 2,4 (2,4–2,4835)	3,1–10,6	2,4	2,4; 5
Швидкість передачі даних, Мбіт/с	До 2	До 27	До 2	До 1000

одного імпульсу. Тобто, переданий сигнал використовує лінійну частотну модуляцію (чирп). У LoRaWAN чирповані хвилі використовуються для передачі даних через бездротові канали на великі відстані з низьким енергоспоживанням. Чирповані хвилі у LoRaWAN генеруються за допомогою техніки CSS (Chirp spread spectrum). Під час передачі даних чирповані хвилі використовуються для кодування інформації та її передачі через RF-канали.

Чирпована хвиля в LoRaWAN адаптується до вимог різних застосунків, забезпечуючи налаштування частоти передачі, довжини та відстані. Хоча сигнал зазнає впливу зовнішніх факторів, таких як затухання чи спотворення, його можна відновити завдяки ефективним алгоритмам обробки. Ця технологія забезпечує стійкість до перешкод і зменшує втрати сигналу, що підвищує надійність передачі.

Чирповані хвилі широко застосовуються в комунікаціях, радіолокації та медичній візуалізації. Їхні ключові переваги включають здатність працювати у складних умовах, покращувати зв'язок у середовищах з багатьма відбиваючими об'єктами та

ефективно виявляти слабкі сигнали. Ці властивості роблять чирповані хвилі цінним інструментом для сучасних бездротових технологій [6].

Чирпована хвиля зазвичай описується за допомогою математичної формули, яка відображає зміну частоти в часі. Загальна форма для чирпованої хвилі може бути представлена як:

$$s(t) = A \times \sin\left(2\pi\left(f_0 t + \frac{k}{2} t^2\right)\right), \quad (1)$$

де  $s(t)$  – амплітуда чирпованої хвилі в момент часу  $t$ ;  $A$  – амплітуда хвилі (максимальне значення);  $f_0$  – початкова частота;  $k$  – коефіцієнт, що визначає швидкість зміни частоти (зазвичай обчислюється як  $k = \frac{f_1 - f_0}{T^2}$ , де  $f_1$  – кінцева частота, а  $T$  – час тривалості чирпованої хвилі).

Ця формула описує, як частота хвилі змінюється в часі, створюючи характерний чирпований сигнал [7].

Однак розповсюдження хвиль у мережі LoRa також може залежати від інших факторів, таких як висота антен, топографічні особливості та різна щільність об'єктів.

У CSS дані кодується за допомогою чирпованої хвилі, що збільшує ширину сигналу в порівнянні з початковою чирпованою хвилею, після чого він ділиться на кілька блоків і розподіляється на кількох частотах. Кількість частот, на які буде розподілено сигнал, залежить від смуги пропускання чирпованої хвилі та роздільної здатності сигналу. Кожна частота несе частину даних, а всі ці частоти об'єднуються для формування CSS сигналу [8].

Для передачі CSS сигналу частота сигналу змінюється безперервно у певному порядку, відомому як послідовність стрибків частоти. Ця послідовність генерується за допомогою заздалегідь визначеного алгоритму і ділиться на кілька сегментів. Під час передачі сигналу частота змінюється безперервно відповідно до порядку, в якому сегменти послідовності змінюють частоту.

Крім того, розподіл частот та безперервна зміна частоти підвищують безпеку сигналу, оскільки без знання послідовності зміни частот іншим важко розшифрувати сигнал. Технологія CSS застосовується в багатьох комунікаційних додатках, включаючи GPS-навігаційні системи, мережі LoRa та IoT-застосунки [1].

Протокол AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector) розроблений для бездротових ad-hoc мереж і мобільних пристроїв. Він забезпечує маршрутизацію за запитом, підтримує unicast і multicast, і ефективно працює у великих мережах із нерівномірним розподілом вузлів. На відміну від протоколу DSDV, AODV мінімізує використання ширококомовних повідомлень, знижуючи обсяг маршрутизаційного трафіку.

Процес пошуку маршруту розпочинається, коли вихідний вузол відправляє пакет RREQ (Route Request) до своїх сусідів. Пакети передаються мережею, доки вузол призначення або проміжний вузол із необхідною маршрутною інформацією не відповість. Унікальні ідентифікатори трансляції та

порядкові номери забезпечують актуальність і запобігання циклам у маршрутах.

Проміжні вузли зберігають зворотний шлях до вихідного вузла при отриманні першого пакета RREQ, ігноруючи наступні дублікати. Коли пакет RREQ досягає вузла призначення, останній відправляє пакет RREP (Route Reply) назад, формуючи прямий маршрут. Завдяки цьому встановлюється повноцінний шлях для двосторонньої передачі даних.

Пакет RREP проходить через вузли зворотним шляхом, оновлюючи таблиці маршрутизації та створюючи симетричний канал між вузлами-джерелом і призначенням. Це дозволяє вузлам підтримувати актуальні маршрути без зайвого обміну таблицями.

Для обробки маршрутних і даних пакетів використовується окремий алгоритм. Вузли аналізують вхідні повідомлення, оновлюють таблиці маршрутизації та визначають подальші дії залежно від типу пакета. Завдяки цьому AODV забезпечує ефективну маршрутизацію, навіть у динамічних і масштабованих мережах.

Для збору даних на великих територіях без використання Wi-Fi та Ethernet застосовуються радіомодулі, що використовують технологію LoRa. Дальність передачі залежить від потужності передавача, типу антени, робочої частоти, умов видимості та зовнішніх перешкод і може варіюватися від сотень метрів до десятків кілометрів. Модуль E32-868T30D є оптимальним вибором для побудови мережі завдяки його технічним характеристикам, що забезпечують надійність і широкий радіус дії.

На рис. 1 показано схему підключення модуля E32-915T30D (LoRa-модуль), плати Arduino Nano та акумулятора типу LiPo (3,7 В; 2000 мА·год) через модуль живлення.

Акумулятор підключений до модуля живлення. Живлення з акумулятора надходить на вхідний роз'єм модуля

(позначений як IN+ і IN-). Вихідний роз'єм модуля живлення (OUT 5V і GND) забезпечує стабільне 5 В для живлення інших компонентів.

Вихідна напруга 5 В із модуля живлення підключена до виводу VIN плати Arduino Nano, забезпечуючи її роботу, також до LoRa-модуля на контакт VCC (живлення). Загальний провід (GND) також з'єднаний між акумулятором, LoRa-модулем та Arduino Nano.

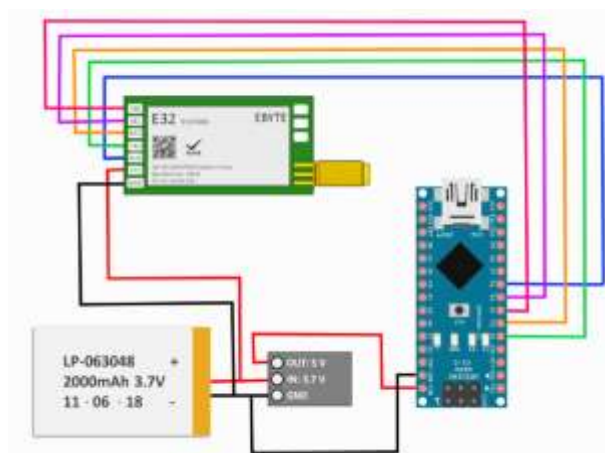


Рисунок 1 – Схема підключення модуля, плати та акумулятора

LoRa-модуль E32-915T30D підключений до Arduino Nano. Контакти M0 та M1 LoRa-модуля під'єднані до відповідних цифрових пінів Arduino Nano D2 і D3. Контакт AUX модуля підключений до іншого цифрового піна на Arduino Nano. Контакти TX та RX LoRa-модуля підключені відповідно до пінів RX та TX на Arduino Nano для UART-комунікації. LoRa-модуль отримує 5 В живлення через контакт VCC, а контакт GND з'єднаний із загальною землею (GND).

Схема забезпечує зв'язок LoRa-модуля з Arduino Nano для передачі даних, а також стабільне живлення від акумулятора через модуль перетворення напруги.

Для передавача буде використано стандартну штиркову антену для частоти передачі даних 868 МГц. Оптимальна довжина антени розраховується за формулою:

$$L = \frac{c}{f \times \sqrt{\epsilon}}, \quad (2)$$

де  $L$  – довжина антени, м;  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $c = 300\,000$  км/с;  $f$  – частота роботи антени,  $f = 868$  МГц для модуля E32-868T30D;  $\epsilon$  – відносна діелектрична проникність середовища навколо антени (безрозмірна величина).

Отже, розрахуємо довжину хвилі ( $\lambda$ ):

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{868 \times 10^6} = 0,345 \text{ м.}$$

Це повна довжина хвилі. Для штиркової антени зазвичай використовується 1/4 довжини хвилі:

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{0,345}{4} = 0,086 \text{ м} = 8,6 \text{ см.}$$

Отже, оптимальна довжина антени для частоти 868 МГц становить приблизно 8,6 см у повітрі.

На рис. 2 представлено графік, який ілюструє зміну напруги батареї LiPo (літій-полімерної батареї) в процесі роботи двох різних систем. Це дозволяє наочно побачити, як змінюється енергоспоживання кожної з систем протягом часу.

Графік демонструє, як напруга батареї поступово знижується від початкового значення, яке становить близько 4,16 В для системи «Demo» і 4,13 В для системи «Blinky», до кінцевих значень – 3,3 В для «Demo» та 3,2 В для «Blinky». Таке зниження рівня напруги є нормальним явищем для батарей LiPo, оскільки вони витрачають енергію під час роботи, і заряд залишкової батареї поступово зменшується.

Графік на рис. 2 також показує часову залежність зміни напруги, що дозволяє оцінити тривалість роботи системи, перш ніж рівень напруги досягне критичної позначки. Ці дані є важливими для розуміння того, як довго кожен з пристроїв може працювати без підзарядки. З графіка видно, що в обох випадках час роботи системи майже однаковий, не зважаючи на те, що один модуль (передатчик)

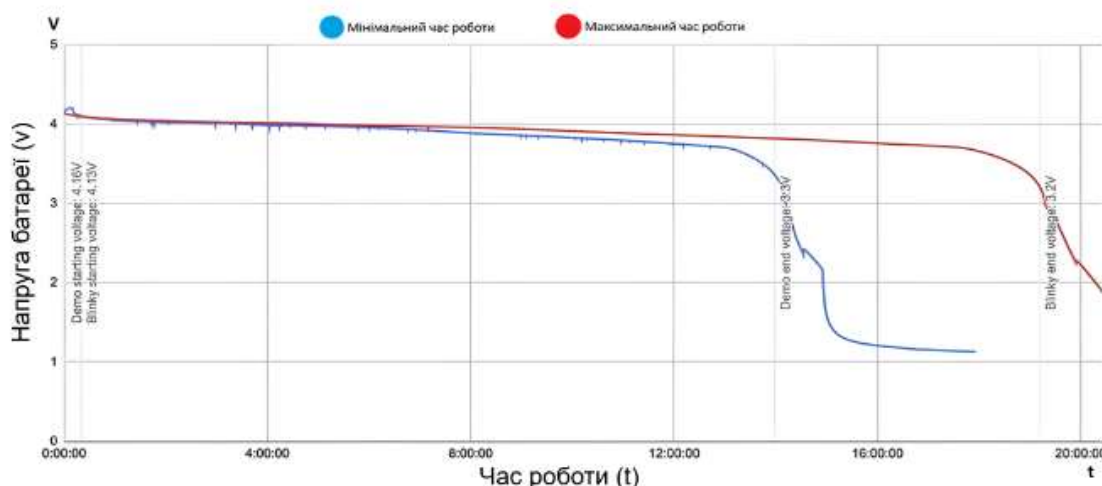


Рисунок 2 – Графік зміни напруг батареї

відправляє пакет завжди, а інший (приймач) приймає пакети без зупину.

Тестування системи проводилося у надзвичайно складних умовах, які значно впливали на якість передачі інформації. Локацією для цього експерименту було обрано село Володимирівка, розташоване на значній відстані від точки передачі сигналу (рис. 3). Основною перешкодою була відсутність прямої видимості – точка передачі знаходилася за лінією горизонту, що створювало додаткові труднощі із забезпеченням стабільного зв'язку.



Рисунок 3 – Дистанція тесту

Крім цього, на шляху сигналу були густі насадження, які поглинали та розсіювали радіохвилі, знижуючи ефективність передачі. Сигнал проходив

через інше село Шуріне, у якому розташовані дві телекомунікаційні вежі, що також створювали потенційні перешкоди через інтерференцію сигналів. Незважаючи на всі ці фактори, система мала продемонструвати свою здатність підтримувати зв'язок, навіть у таких несприятливих умовах, що є важливим критерієм для оцінки її надійності та ефективності.

За результатами тестування було виявлено, що із збільшенням дистанції затримка передачі даних зростає майже в кілька разів. Це свідчить про те, що на великих відстанях система стикається з додатковими викликами, пов'язаними з поширенням сигналу та перешкодами на його шляху. Попри це, система продемонструвала стабільну роботу, хоча й працювала на межі своїх можливостей, використовуючи максимальну потужність передавача для підтримання зв'язку.

Аналізуючи результати усіх проведених тестів, де відстань становила лише 2,84 км та 7,14 км, а затримки – 121 мс та 423 мс відповідно, можна зробити висновок, що система працює значно стабільніше на менших дистанціях. У цьому випадку збільшення відстані майже в 5 разів призвело до зростання затримки майже в 70 разів, що вказує на лінійну залежність між відстанню та якістю показників зв'язку.



Рисунок 4 – Відсоток отриманих і пропущених пакетів

На коротких відстанях, близько 1 км, затримка майже відсутня, що свідчить про стабільний і швидкий зв'язок. При відстані 2,83 км та 5 км затримка вже помітна, але все ще знаходиться на прийнятному рівні для більшості сценаріїв використання. Ці значення вказують на те, що мережа працює ефективно на середніх відстанях без значних втрат у швидкості передачі даних.

Однак із досягненням відстані 7,14 км затримка стає більш відчутною. Вона свідчить про те, що якість зв'язку починає погіршуватися. На відстані 11 км ситуація суттєво змінюється – затримка значно збільшується, досягаючи декількох тисяч мілісекунд. Нарешті, при максимальній відстані в 14,76 км затримка сягає свого піку, що робить передачу даних дуже повільною.

Це показує, що, хоча LoRaWAN добре справляється з передачею даних на невеликих та середніх відстанях, на великих відстанях виникають значні труднощі через затримки. Це може бути важливим фактором при плануванні мережі, де необхідно забезпечити баланс між дальністю зв'язку та якістю передачі даних.

На діаграмі показано співвідношення між отриманими та втраченими пакетами даних залежно від відстані між вузлами передавача (рис. 4). Аналізуючи графік, можна побачити, що на коротких і

середніх відстанях передача даних відбувається без втрат – усі пакети успішно досягають приймача. Це свідчить про стабільність і надійність зв'язку на відстанях до 7 км, де мережа працює ефективно та без збоїв.

Однак, коли відстань збільшується до 11 км, починають з'являтися незначні втрати пакетів – близько 10%. Це можна пояснити погіршенням сигналу на більш віддалених ділянках мережі, де вплив зовнішніх факторів стає суттєвим. При подальшому збільшенні відстані до 14 км втрата пакетів зростає до 17%. Такий рівень втрат свідчить про поступове зниження якості зв'язку, хоча він залишається прийнятним для ряду сценаріїв використання LoRaWAN. Втрати пакетів можна зменшити за рахунок збільшення ємності акумулятора та потужності модуля.

#### Висновки

Перші випробування показали стабільний зв'язок на відстанях до 2,84 км із мінімальною затримкою, що свідчить про надійність і ефективність системи в оптимальних умовах. Під час тестування системи на відстані 7,14 км у змішаній місцевості, де сигнал зустрічав природні перешкоди, затримка зросла до 423 мс. Це очікувано, враховуючи вплив дерев, пагорбів та інших факторів. Останнє випробування проведено у найскладніших умовах – зв'язок здійснювався на відстані

14 км без прямої видимості. Попри значне збільшення затримки до кількох секунд, система змогла підтримувати передачу даних. Цей результат підтверджує залежність якості зв'язку від відстані та наявності фізичних перешкод.

Тести показали, що система працює стабільно й відповідає технічним вимогам, але для покращення її роботи на великих відстанях доцільно збільшити потужність передавача та використовувати більш ємні акумулятори. Загалом, система підтвердила свою ефективність і готовність до використання в реальних умовах для моніторингу та контролю датчиків у різних галузях за допомогою віддаленого бездротових каналів зв'язку.

Виконана оцінка максимальної довжини каналу зв'язку показала, що для обраних вхідних параметрів протоколу LoRaWAN мережа працює ефективно та без втрати сигналу на відстані від 3 км до 14 км.

В результаті виконаних досліджень було вдосконалено метод передачі даних, що використовує для бездротової передачі даних за технологією LoRa чірплет-декомпозицію сигналу. Подальші дослідження мають бути спрямовані на збільшення дистанції віддаленого моніторингу систем датчиків на об'єктах без втрати якості сигналу та подальшим впровадженням енергозберігаючих технологій.

#### Список використаних джерел / References

1. Montagny S. LoRa – LoRaWAN and IoT. Savoie Mont Blanc University, 2022. 131 p.
2. Technology LoRaWAN. URL: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/reference-information/66634.html> (дата звернення: 15.12.2024).
3. Yadav Dh., Varkey T., Aadil M. Open Lora Design and Implementation for IoT. *Internat. Conf. on Power Energy, Environment & Intell. Control (PEEIC)*. Greater Noida, India, 2023. P. 822–826. DOI: [10.1109/PEEIC59336.2023.10451093](https://doi.org/10.1109/PEEIC59336.2023.10451093)

4. Babayiğit B., Doğan F. Y. Longest Distance Detection for Data Transmission with LoRa in Urban and Extra-Urban Area. *2023 8th Internat. Conf. on Computer Sci. and Engin. (UBMK)*, Burdur, Turkiye, 2023. P. 336–340. DOI: [10.1109/UBMK59864.2023.10286581](https://doi.org/10.1109/UBMK59864.2023.10286581)

5. Shpatar P., Nichiy B., Nichiy S. Study on the Energy Efficiency of LoRa Technologies in Wireless Monitoring Networks. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. Vol. 3. P. 166–174. DOI: [10.31891/2219-9365-2024-79-21](https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-21) [in Ukrainian].

6. Kumar R., Sarvagya Mr., Prasad S. N., Kavya B. S. Design and Implementation of Collaborative Energy Efficient IoT- based LoRa WAN. *Power System Technology*, 2024. Vol. 48. No. 2. P. 1398–1411. DOI: [10.52783/pst.637](https://doi.org/10.52783/pst.637)

7. Kufakunesu R., Hancke G., Abu-Mahfouz A. Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN: Recent Solutions and Major Challenges. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2020. Vol. 20. No. 18. DOI: [10.3390/s20185044](https://doi.org/10.3390/s20185044)

8. Maleki A., Nguyen H. H., Bedeer E., Barton R. A Tutorial on Chirp Spread Spectrum Modulation for LoRaWAN: Basics and Key Advances. *IEEE Open Jnl of the Communic. Society*. 2024. Vol. 5. P. 4578–4612. DOI: [10.1109/OJCOMS.2024.3433502](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2024.3433502)

#### LONG-RANGE RADIO COMMUNICATION SYSTEM FOR SENSOR CONTROL BASED ON SINGLE-BOARD MICROCOMPUTERS WITH LoRa

D. V. Varankin, I. M. Zhuravska,  
K. O. Obukhova

<sup>1</sup>Petro Mohyla Black Sea National University;  
68 Desantniki St. 10, Mykolaiv, 54000, Ukraine;  
e-mail: [varankin.d@chmnu.edu.ua](mailto:varankin.d@chmnu.edu.ua),  
[iryna.zhuravska@chmnu.edu.ua](mailto:iryna.zhuravska@chmnu.edu.ua),  
[kateryna.obukhova@chmnu.edu.ua](mailto:kateryna.obukhova@chmnu.edu.ua)

УДК 004.7

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-130-136

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ВІД ДОВЖИНИ СЕГМЕНТУ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ МЕРЕЖІ SAFETYBUS P

*С. М. Бабчук, І. С. Бабчук*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: serhii.babchuk@nung.edu.ua*

Доступність, надійність, гнучкість і широкі можливості діагностики є важливими властивостями, які користувачі очікують від сучасних систем автоматизації. В умовах стрімкого розвитку технологій та підвищених вимог до безпеки, автоматизовані системи повинні відповідати високим стандартам якості та надійності. Наразі багато систем автоматизації базуються на використанні спеціалізованих цифрових мереж, що забезпечують ефективний контроль та управління технологічними процесами. Однією з таких мереж є спеціалізована цифрова мережа SafetyBUS p, яка відповідає вимогам рівня SIL 3 згідно зі стандартом IEC 61508 та категорії 4 стандарту EN 954-1. Завдяки відповідності цим стандартам SafetyBUS p може застосовуватися у критично важливих сферах, пов'язаних із забезпеченням безпеки життя та здоров'я людей, зокрема у виробничих та транспортних технологіях. Використання цієї мережі дозволяє підвищити рівень безпеки та надійності автоматизованих систем керування, що є ключовим фактором для підприємств різних галузей, зокрема промислових і нафтогазових. В рамках дослідження було встановлено, що одним з ключових параметрів мережі SafetyBUS p є швидкість передавання даних, яка залежить від довжини сегмента мережі. Було проаналізовано різні математичні моделі для опису цієї залежності, серед яких лінійна, поліномна, експоненційна та логарифмічна. Однак жодна з них не відображає характер зміни швидкості передавання даних з достатньою точністю. На основі аналізу було визначено, що оптимальною моделлю є степенева функція, яка дозволяє описати залежність швидкості передавання даних від довжини сегмента мережі SafetyBUS p з похибкою від 1,05% до 3,21%. Розроблена математична модель дає можливість прогнозувати та оптимізувати параметри передавання даних у мережі SafetyBUS p, що сприяє ефективнішому проектуванню автоматизованих систем керування технологічними процесами. Застосування цієї моделі дозволяє значно покращити функціонування систем, мінімізувати затримки у передаванні даних та підвищити загальну продуктивність автоматизованих процесів. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення мережевих технологій та впровадження інноваційних підходів у сфері промислової автоматизації.

**Ключові слова:** SafetyBUS p, математична модель, спеціалізована цифрова мережа, fieldbus, автоматизована система керування технологічним процесом.

Accessibility, reliability, flexibility and extensive diagnostic capabilities are important features that users expect from modern automation systems. In the context of rapid technological development and increased safety requirements, automated systems must meet high standards of quality and reliability. Currently, many automation systems are based on the use of specialized digital networks that provide effective control and management of technological processes. One of such networks is the specialized digital network SafetyBUS p, which meets the requirements of SIL 3 according to the IEC 61508 standard and category 4 of the EN 954-1 standard. Due to compliance with these standards, SafetyBUS p can be used in critical areas related to ensuring the safety of life and health of people, in particular in production and transport technologies. The use of this network allows to increase the level of safety and reliability of automated control systems, which is a key factor for enterprises in various industries, in particular industrial and oil and gas. The study found that one of the key parameters of the SafetyBUS p network is the data transfer rate, which depends on the length of the network segment. Various mathematical models were analyzed to describe this dependence, including linear, polynomial, exponential, and logarithmic. However, none of them reflects the nature of the change in the data transfer rate with sufficient accuracy. Based on the analysis, it was determined that the optimal model is a power function, which allows describing the dependence of the data transfer rate on the length of the SafetyBUS p network segment with an error of 1.05% to 3.21%. The developed mathematical model makes it possible to predict and optimize data transfer parameters in the SafetyBUS p network, which contributes to a more effective design of automated process control systems. The use of this model allows significantly improving the functioning of systems, minimizing delays in data transfer, and increasing the overall productivity of automated processes. The results obtained can be used to further improve network technologies and implement innovative approaches in the field of industrial automation.

**Keywords:** SafetyBUS p, mathematical model, specialized digital network, fieldbus, automated technological process control system.

### **Постановка проблеми**

Наразі на світовому ринку представлена велика кількість виробників у різних галузях. Наявність товарів однакового призначення від різних компаній породжує конкуренцію між ними, що дозволяє споживачам отримувати якісніші товари за нижчими цінами. Завдяки конкуренції виробники змушені постійно вдосконалювати свою продукцію та шукати шляхи створення товарів, які відповідають потребам споживачів і мають нижчу вартість у порівнянні з продукцією конкурентів [1].

Одним зі способів підвищення продуктивності виробничих процесів є впровадження систем автоматизації на фабриках та заводах.

Раніше автоматизовані системи базувались на централізованій моделі управління технологічними процесами. Нині у світі широко використовуються автоматизовані системи, що базуються на децентралізованій моделі управління. Застосування децентралізованого підходу дозволяє значно підвищити ефективність виробництва, включаючи покращення якості продукції і зменшення витрат. До того ж такі системи легше, швидше та економічніше розгортаються. Порівняно з централізованими рішеннями, децентралізовані системи є більш зручними та менш витратними в підтримці та обслуговуванні [1].

Зазвичай децентралізовані системи управління технологічними процесами створюються на основі спеціалізованих цифрових мереж, в яких надійна передача даних у цифровому форматі.

В теперішній час користувачам доступні понад сто різних спеціалізованих цифрових мереж, тому користувачів вибір тієї мережі, яка допоможе їхньому підприємству досягти вищого рівня ефективності та конкурентоспроможності, може бути досить складним завданням [1].

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Серед більш як ста спеціалізованих цифрових мереж необхідно зазначити

спеціалізовану цифрову мережу SafetyBUS p.

Спеціалізована цифрова мережа SafetyBUS p є стандартом для безпечного зв'язку в системах автоматизації, оскільки відповідає рівню SIL 3 IEC\_61508, а також категорії безпеки Cat 4 EN\_954-1 [2,3].

Спеціалізована цифрова мережа SafetyBUS p була розроблена в період з 1995 до 1999 року компанією Pilz GmbH und Co. KG (Німеччина). Дана мережа з 1999 року підтримується організацією користувачів Safety Network International e.V.

Мережа SafetyBUS p призначена для передачі даних, що стосуються безпеки. Цю спеціалізовану цифрову мережу використовують там, де необхідний захист від ризиків, які можуть вплинути на життя або здоров'я людей, а також на цінності або обладнання [2,3].

Одними з основних сфер використання спеціалізованої цифрової мережі SafetyBUS p є:

- автоматизація технологічних процесів та виробництва (наприклад, виробництво автомобілів);
- транспортні системи (наприклад, канатні дороги).

Спеціалізована цифрова мережа SafetyBUS p створена на базі спеціалізованої цифрової мережі CAN. Окрім рівнів 1 і 2 OSI-моделі, які визначені для спеціалізованої цифрової мережі CAN, SafetyBUS p додатково має механізми безпеки на рівнях 2 і 7 OSI-моделі.

Для виявлення помилок під час передавання даних та всередині пристроїв SafetyBUS p використовує такі механізми [2,3]:

- порядкова нумерація;
- відлуння;
- ідентифікатори в передавача та приймача;
- перевірка цілісності даних за допомогою CRC.

Основні характеристики спеціалізованої цифрової мережі SafetyBUS p [2,3]:

- максимальна кількість вузлів в одній мережі - до 64;
- швидкість передавання даних від 20 до 500 кбіт/с залежно від фізичного розміру мережі;
- максимальна довжина сегмента мережі - до 3500 м;
- кілька сегментів мережі можуть бути об'єднані;
- можна досягнути гарантованого часу реакції на помилку до 20 мс;
- підходить для застосувань відповідно до SIL 3 IEC 61508 і Cat. 4 EN 954-1;
- живлення пристроїв через той самий кабель, яким передаються дані;
- сегменти мережі можуть бути реалізовані за допомогою оптоволоконного кабелю, радіозв'язку або інфрачервоного зв'язку.

Мережі SafetyBUS р містять тільки безпечні пристрої. Ці пристрої, як правило, мають внутрішнє резервування. Використання безпечних пристроїв для забезпечення безпеки зазвичай вимагає сертифікації пристроїв уповноваженими органами. Функціональна сертифікація пристроїв для мережі SafetyBUS р здійснюється організацією користувачів Safety Network International e.V.

Організація користувачів SafetyBUS р Club International e.V була заснована в 1999 році, як асоціація користувачів і виробників пристроїв SafetyBUS р. У 2000 році була заснована національна організація в Японії, а у 2001 році створена відповідна національна організація в США. У 2006 році організація Club International e.V змінила назву на Safety Network International e.V.

Нині користувачам пропонується великий вибір програмних і апаратних рішень для спеціалізованої мережі SafetyBUS р [4-11].

З огляду на вищевказане спеціалізовану цифрову мережу SafetyBUS р можна використовувати в системах автоматизації технологічних процесів та виробництв в різних промислових та нафтогазових підприємствах.

Максимальна довжина одного сегменту спеціалізованої цифрової мережі SafetyBUS р – до 3500 м. Швидкість передавання даних в спеціалізованій цифровій мережі SafetyBUS р залежить від довжини сегмента мережі.

В джерелі [12] є інформація про швидкості передавання даних, які визначені виробником спеціалізованої цифрової мережі SafetyBUS р для різних за довжиною сегментів даної мережі (табл. 1).

**Таблиця 1 – Швидкості передавання даних, які визначені виробником мережі SafetyBUS р для різних за довжиною сегментів даної мережі**

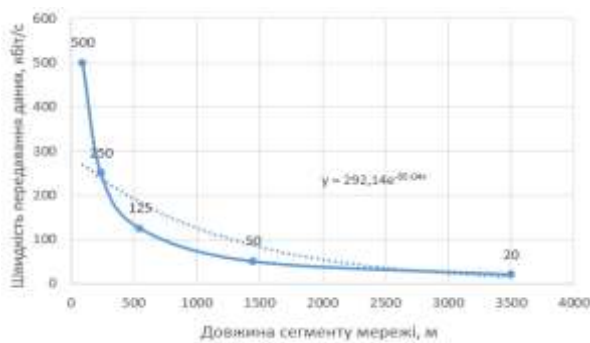
Довжина сегменту мережі SafetyBUS р, м	Швидкість передавання даних в мережі SafetyBUS р, кбіт/с
95	500
240	250
550	125
1450	50
3500	20

Невизначеність залежності швидкості передавання даних від довжини сегмента мережі SafetyBUS р створює додаткові труднощі при проектуванні систем автоматизації, які використовують дану спеціалізовану цифрову мережу.

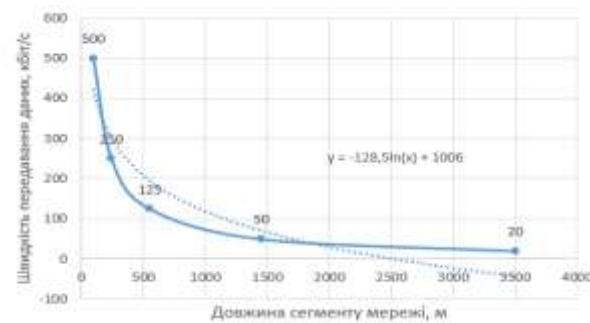
**Мета досліджень.** Метою виконаних досліджень було визначення математичної моделі зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS р.

**Визначення математичної моделі зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS р**

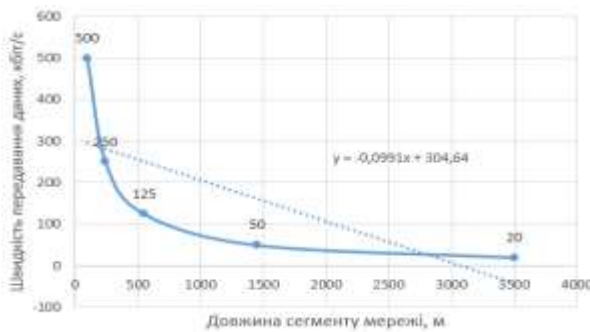
На першому етапі дослідження було прийнято рішення щодо необхідності виявлення характеру залежності зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS р. Для досягнення поставленої мети було здійснено моделювання вищевказаної залежності за допомогою експоненціальної, логарифмічної, лінійної та поліноміальної функцій (рис. 1).



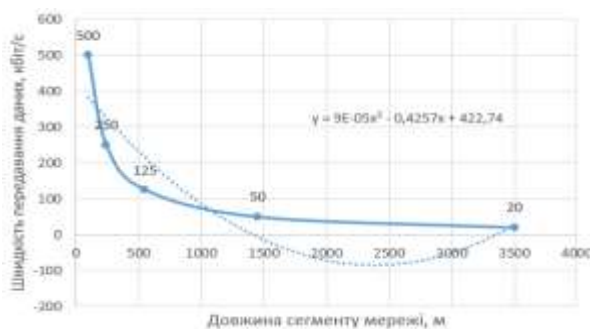
а)



б)



в)



г)

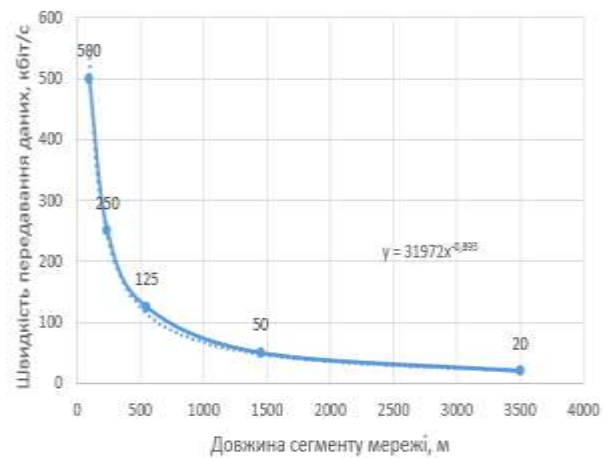
- а) експоненціальна модель;
- б) логарифмічна модель в) лінійна модель;
- г) поліноміальна модель

**Рисунок 1 – Графіки математичних моделей зміни швидкості передавання даних в залежності від довжини сегменту мережі SafetyBUS р та точок швидкостей передавання даних, визначених виробником мережі SafetyBUS р для довжин сегментів цієї мережі**

З рисунка 1 видно, що експоненціальна, логарифмічна, лінійна та поліноміальна математичні моделі погано відтворюють зміну швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS р.

Встановлено, що найкраще відтворює зміну швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS р степенева функція (рис. 2):

$$y(x) = 31972 x^{-0,893} \quad (1)$$



**Рисунок 2 – Графік визначеної математичної моделі (1) зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS р та точок швидкостей передавання даних визначених виробником мережі SafetyBUS р для довжин сегментів цієї мережі**

В таблиці 2 відображено результати дослідження значень швидкостей передавання даних, встановлених виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS р, для сегментів мережі різної довжини та швидкостей передавання даних, які встановлені за допомогою математичної моделі (1).

Як видно з таблиці 2, визначена математична модель (1) відтворює зміну швидкості передавання даних в спеціалізованій цифровій мережі SafetyBUS р від довжини сегмента з похибкою від 9,57% до 3,91%.

За результатами проведених досліджень було встановлено, що швидкість передавання даних в мережі SafetyBUS р можна встановити за довжиною сегмента даної мережі за

**Таблиця 2 – Аналіз значень швидкостей передавання даних встановлених виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p, для сегментів мережі різної довжини та швидкостей передавання даних, які встановлені за допомогою математичної моделі (1)**

Довжина сегменту мережі SafetyBUS p, м	Швидкість передавання даних в спеціалізованій мережі SafetyBUS p, яка визначена виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p, кбіт/с	Швидкість передавання даних в спеціалізованій мережі SafetyBUS p, яка визначена за допомогою математичної моделі (1), кбіт/с	Похибка, кбіт/с	Похибка, %
95	500	547,85	47,85	9,57
240	250	239,46	10,54	4,21
550	125	114,19	10,81	8,65
1450	50	48,05	1,95	3,91
3500	20	21,87	1,87	9,37

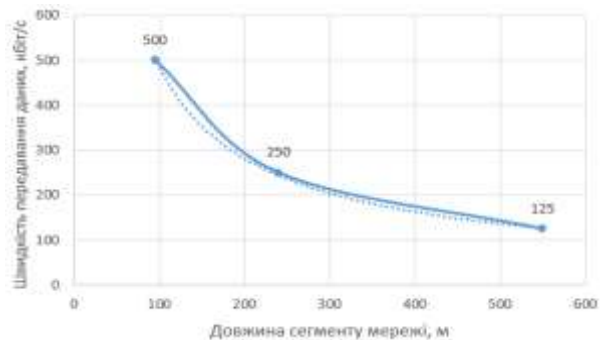
допомогою математичної моделі на базі степеневі функції:

$$y(x) = \begin{cases} 183622x^{-0.789}, & 95 \leq x < 550 \\ 65246x^{-0.99}, & 550 \leq x \leq 3500 \end{cases} \quad (2)$$

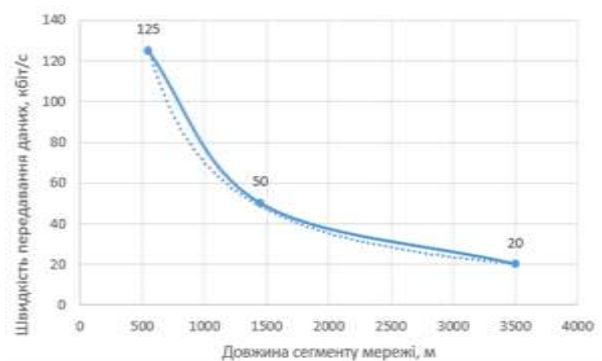
Графік визначеної математичної моделі (2) зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p та точок швидкостей передавання даних, визначених виробником мережі SafetyBUS p, для довжин сегментів цієї мережі від 95 м до 550 м зображено на рисунку 3.

Графік визначеної математичної моделі (2) зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p та точок швидкостей передавання даних, визначених виробником мережі SafetyBUS p, для довжин сегментів цієї мережі від 550 м до 3500 м зображено на рисунку 4.

В таблиці 3 відображено результати дослідження значень швидкостей передавання даних встановлених виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p для сегментів мережі різної довжини та швидкостей передавання даних, які встановлені за допомогою математичної моделі (2).



**Рисунок 3 – Графік визначеної математичної моделі (2) зміни швидкості передавання даних в залежності від довжини сегменту мережі SafetyBUS p та точок швидкостей передавання даних, визначених виробником мережі SafetyBUS p, для довжин сегментів цієї мережі від 95 м до 550 м**



**Рисунок 4 – Графік визначеної математичної моделі (2) зміни швидкості передавання даних залежно від довжини сегмента мережі SafetyBUS p та точок швидкостей передавання даних, визначених виробником мережі SafetyBUS p, для довжин сегментів цієї мережі від 550 м до 3500 м**

**Таблиця 3 – Аналіз значень швидкостей передавання даних встановлених виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p для сегментів мережі різної довжини та швидкостей передавання даних, які встановлені за допомогою математичної моделі (2)**

Довжина сегменту мережі SafetyBUS p, м	Швидкість передавання даних в спеціалізованій мережі SafetyBUS p, яка визначена виробником спеціалізованої мережі SafetyBUS p, кбіт/с	Швидкість передавання даних в спеціалізованій мережі SafetyBUS p, яка визначена за допомогою математичної моделі (1), кбіт/с	Похибка, кбіт/с	Похибка, %
95	500	505,24	5,24	1,05
240	250	243,18	6,82	2,73
550	125	126,36	1,36	1,08
1450	50	48,39	1,61	3,21
3500	20	20,23	0,23	1,13

Як видно з таблиці 2, визначена математична модель (1) відтворює зміну швидкості передавання даних в спеціалізованій цифровій мережі SafetyBUS p від довжини сегмента з похибкою від 1,05% до 3,21%.

### Висновки

Визначено математичну модель зміни швидкості передавання даних від довжини сегмента спеціалізованої цифрової мережі SafetyBUS p, яка відтворює зміну швидкості передавання даних в спеціалізованій цифровій мережі SafetyBUS p від довжини сегменту з похибкою від 1,05% до 3,21%. Визначена математична модель зміни швидкості передавання даних в мережі SafetyBUS залежно від довжини сегмента даної спеціалізованої цифрової мережі сприятиме ефективнішому проектуванню автоматизованих систем керування технологічними процесами на базі мережі SafetyBUS p.

### Список використаних джерел / References

1. Babchuk S.M., Babchuk I.S. Matematychna model zminy shvydkosti peredachi danykh v zalezhnosti vid zminy dovezhyyny sehmentu spetsializovanoi tsyfrovoi merezhi DeviceNet na bazi tovtstoho kruhloho

kabelia. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. 2023. №3. P. 115-119. [in Ukrainian]

2. SafetyBUS p. URL: <https://en-academic.com/dic.nsf/enwiki/5121287>

3. SafetyBUS p. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/SafetyBUS\\_p](https://en.wikipedia.org/wiki/SafetyBUS_p)

4. Programmable Safety Systems. PSS-Range. URL: [http://t-life.com.ua/img/files/Pilz/PSS\\_SB\\_ACTIVE\\_JUNC\\_BAS\\_Op\\_Man\\_20748-EN-03.pdf](http://t-life.com.ua/img/files/Pilz/PSS_SB_ACTIVE_JUNC_BAS_Op_Man_20748-EN-03.pdf)

5. SafetyBus P Head Module. URL: <https://www.classicautomation.com/Part/312010?srsltid=AfmBOoo9eEFaWyBN1XOyJ2Y6q5lgi5zqUFbGbJ8KTsKDy78ef5ALXLkD>

6. Bridge for SafetyBUS p. URL: [https://docs.galco.com/techdoc/pilz/pss\\_sb\\_bridge\\_dat.pdf](https://docs.galco.com/techdoc/pilz/pss_sb_bridge_dat.pdf)

7. SafetyBUS p Digital Input Module. URL: [https://www.classicautomation.com/Part/311300?srsltid=AfmBOooHFLmtBcf102mps83wFDWBHXpDBJlosnXDPeqEefF6UM\\_YqpO1](https://www.classicautomation.com/Part/311300?srsltid=AfmBOooHFLmtBcf102mps83wFDWBHXpDBJlosnXDPeqEefF6UM_YqpO1)

8. SEMI E54.15 - Specification for Sensor/Actuator Network Communications for SafetyBUS p. URL: <https://store-us.semi.org/products/e05415-semi-e54-15-sensor-actuator-network-communication-specification-for-safetybus-p>

9. We provide the right products for your SafetyBUS p diagnosis. URL: <https://www.indu-sol.com/en/diagnosis/safety-bus-p/products/>

10. SafetyBUS p cable for flexible applications. URL: <https://www.sab-cable.com/products/bus-cables-and-wires/s-sbp-684-move.html>

11. SafetyBUS p FRNC STATIC yellow 3 x 0,75 mm<sup>2</sup>. URL: <https://shop.helukabel.com/sg-en/safetybus-p-frnc-static-m800651/800651>

12. Programmable Safety Systems PSS®-Range: SafetyBUS p. Pilz GmbH & Co. KG. 93 p.

**MATHEMATICAL MODEL OF THE  
DEPENDENCE OF DATA TRANSMISSION  
RATE ON THE LENGTH OF THE  
SEGMENT OF THE SPECIALIZED  
NETWORK SAFETYBUS P**

S. M. Babchuk, I. S. Babchuk

Ivano-Frankivsk National Technical University  
of Oil and Gas,  
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine;  
e-mail: [serhii.babchuk@nung.edu.ua](mailto:serhii.babchuk@nung.edu.ua)

УДК 006.91, 681.2-5

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-137-146

## МЕТОДОЛОГІЧНА МАТРИЦЯ ЗАПОБІГАННЯ МІТМ-АТАКАМ У СТРАТЕГІЧНИХ ТА ЦИВІЛЬНИХ ІНФРАСТРУКТУРАХ

*А. А. Шкітов<sup>1</sup>, Н. Г. Бузоверя<sup>2</sup>, О. А. Стадніченко<sup>3</sup>, К. М. Мажуга<sup>3</sup>, Т. В. Гуменюк<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»;  
вул. Львівська 23, м. Київ, 03115, Україна; e-mail: office@uu.ua*

<sup>2</sup>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна;  
e-mail: nadiia.shyrmovska@nung.edu.ua*

<sup>3</sup>*Український інститут експертизи сортів рослин;  
вул. Генерала Родимцева, 15, м. Київ, 03041, Україна; e-mail: sops@sops.gov.ua*

За сучасних умов кіберзагроза є однією з найбільших сучасних проблем для бізнесу, організацій і звичайних користувачів Інтернету. З кожним роком частота й складність кібератаки зростають, що підтверджують статистичні дані за останні роки. Таким чином, починаючи з 2020 року, відзначено значний сплеск кіберзлочинності, зокрема через атаки на розподілені інформаційні системи. Особливу загрозу становлять атаки типу «Man-in-the-Middle» (MITM), які дозволяють зловмисникам отримувати доступ до конфіденційної інформації як корпоративних систем, так і користувачів персональних даних. Методом дослідження є аналіз видів MITM-атак, їх методики проведення, а також розробка рекомендацій щодо запобігання таким загрозам. Дослідження базується на методах аналізу та опису. У ході роботи відзначаються основні типи MITM-атак, описані їх механізми дії та вплив на інформаційну безпеку. У результатах запропоновано низку методів і рекомендацій щодо протидії цим атакам, які охоплюють як технічні, так і організаційні аспекти. Запропоновані методи спрямовані на забезпечення високого рівня захисту комп'ютерних мереж, зокрема шляхом використання сучасних технологій шифрування, двофакторної автентифікації та системи виявлення аномалій у мережевому трафіку. Результати дослідження можуть бути корисними для адміністраторів безпеки, розробників програмного забезпечення та звичайних користувачів, які хочуть підвищити безпеку своїх даних, особливо в контексті використання публічної мережі Wi-Fi. Практичне значення отриманих результатів уможливлюється при можливості використання запропонованих рекомендацій для підвищення захисту комп'ютерних мереж, зниження ризику реалізації MITM-атаки та розробки більш ефективного програмного забезпечення для забезпечення інформаційної безпеки.

**Ключові слова:** кібератака, MITM-атака, точка доступу, FakeAP, SSL, WPA, SSID, попередження MITM-атак.

Cyber threats are one of the biggest modern problems for businesses, organizations, and ordinary Internet users. Every year, the frequency and complexity of cyber attacks are increasing, as confirmed by statistical data in recent years. Thus, starting in 2020, a significant surge in cybercrime has been noted, in particular through attacks on distributed information systems. A particular threat is posed by Man-in-the-Middle (MITM) attacks, which allow attackers to gain access to confidential information, both corporate systems and users' personal data. The research method is to analyze the types of MITM attacks, their methods of implementation, and the development of recommendations for preventing such threats. The study is based on analysis and description methods. The work identifies the main types of MITM attacks, describes their mechanisms of action and impact on information security. The results suggest a number of methods and recommendations for countering these attacks, covering both technical and organizational aspects. The proposed methods are aimed at ensuring a high level of protection of computer networks, in particular by using modern encryption technologies, two-factor authentication and a system for detecting anomalies in network traffic. The results of the study may be useful for security administrators, software developers and ordinary users who want to increase the security of their data, especially in the context of using a public Wi-Fi network. The practical significance of the results obtained is made possible by the possibility of using the proposed recommendations to increase the security of computer networks, reduce the risk of implementing a MITM attack and develop more effective software to ensure information security.

**Keywords:** cyberattack, MITM attack, access point, FakeAP, SSL, WPA, SSID, MITM attack prevention.

## Вступ

За сучасних умов цифрової епохи, MITM (Man-in-the-Middle) атаки — це одна з найнебезпечніших кіберзагроз, особливо для критичних інфраструктур, таких як енергетичні мережі та фінансові системи. Такі системи передбачають перехоплення або зміну переданих даних між двома сторонами зловмисником, що є актуальним у кіберсучасності. У цій статті розглядаються сучасні методи запобігання MITM-атакам та їх математичне моделювання з метою виявлення таких атак. Це полягає в наступному викладі.

Суть атаки man-in-the-middle доволі проста: злочинець таємно перехоплює трафік з одного комп'ютера та відправляє його кінцевому одержувачу, попередньо прочитавши та змінивши на свою користь.

Атаки MITM надають злочинцю можливість робити такі дії як підміна криптовалютного гаманця для викрадення коштів, перенаправлення браузера на шкідливий вебсайт або ж просто пасивний збір інформації з метою її подальшого злочинного використання.

Кожного разу, коли третя сторона перехоплює інтернет-трафік, це можна ідентифікувати як атаку MITM. Такі дії зовсім неважко зробити злочинцеві навіть без належної автентифікації. Наприклад, загальнодоступні мережі Wi-Fi є гарним джерелом для MITM, оскільки ні маршрутизатор, ні підключений комп'ютер не перевіряють її ідентичність.



Рисунок 1 – схематичний принцип атаки типу man-in-the-middle

У випадку публічної атаки через мережу Wi-Fi зловмисник повинен перебувати поблизу та під'єднатися до тієї

самої мережі, або ж просто мати комп'ютер в мережі, здатний перехоплювати трафік. Не всі атаки MITM вимагають, щоб зловмисник фізично знаходився поруч зі своєю жертвою, оскільки існує велика кількість штамів зловмисного програмного забезпечення, яке здатне викрасти трафік та підмінити інформацію в будь-якому місці, де є можливість інфікувати комп'ютер жертви.

Боротьба з атаками MITM вимагає використання певної форми автентифікації кінцевої точки, наприклад TLS або SSL, яка застосовує ключ ідентифікації, що в ідеалі не може бути підробленим. Слід зазначити, що методи автентифікації стають все сильнішими, що веде до наскрізного шифрування деяких систем.

## Описові передумови у MITM-атак

У цьому контексті MITM-атаки можуть бути виконані через різні вразливості, зокрема мережеві протоколи та незахищені з'єднання. Основні цілі атак: перехоплення конфіденційної інформації (паролі, фінансові дані); модифікація переданих даних; використання здобутої інформації для інших атак (фішинг, соціальна інженерія) [2]. При цьому, нові методи атак структурують Spoofing SSL/TLS. Це, коли зловмисники можуть підмінити сертифікати для підключення до фальшивого сайту. Wi-Fi MITM-атаки: атаки в публічних Wi-Fi мережах, де перехоплюється незашифрований трафік.

## Можливі загрози для інфраструктур

Такі загрози розкривають стратегічні та цивільні об'єкти. Наприклад, енергетичні мережі, мережі водопостачання та фінансові системи мають низку вразливостей: критичність переданих даних; залежність від мережевих систем управління; використання застарілих протоколів безпеки.

## Методи запобігання MITM-атакам

Такі методи стверджують шифрування даних. Це протоколи TLS/SSL, що забезпечують захищене шифрування, яке ускладнює перехоплення та розшифровку даних зловмисниками. Адже TLS використовує асиметричне шифрування

для встановлення з'єднання та симетричне для передачі даних.

За особливих обставин двофакторна аутентифікація (2FA) логічно додає завдяки алгоритму пріоритетності потенційно-ефективний рівень захисту, вимагаючи не лише пароллю, але й одноразового коду чи апаратного токена, без якого ніяк неможливо увійти в систему користування.

При цьому віртуальні приватні мережі (VPN) виступають в якості драйвера, що шифрує трафік між пристроями, роблячи його надійно захищеним навіть, у публічних мережах. Особливо актуальним це постає під час воєнного стану в Україні, коли довкола є значна кількість внутрішніх ворогів (шахраїв, зловмисників, прихованих колаборантів). Адже російський ворог їх часто використовує «в сліпу», використовуючи такі вигідні ворогу умови, що здійснюють інформаційно-психологічний тиск. Серед використаних ворогом «в сліпу», можна віднести категорію тих осіб, що є за своїм станом «синдрому» поведінки на межі адекватності та не адекватності, а саме: вживання алкогольних напоїв та тютюнових виробів, що обумовлюють їх внутрішній авітаміноз. Саме такий метод спостереження потрібний під час воєнно-правового режиму.

В силу вище означеного, системи виявлення вторгнень (IDS) дозволяють виявляти підозрілу активність у реальному часі. Підписні IDS працюють на основі відомих сигнатур атак, тоді як аномальні IDS шукають відхилення від нормального трафіку.

Таким чином, мережева сегментація є однією з ефективно дієвих методів запобігання MITM-атакам в якості сегментації мережі. За цих умов розбиття мережі на ізольовані сегменти певною мірою обмежує можливість зловмисника отримати доступ до всього середовища, навіть якщо він успішно виконає атаку на одну ділянку. Адже сегментовані мережі вводять ворога в оману, а саме цим знижують ймовірність масового

перехоплення даних або впливу на всі системи одночасно.

Тому, у цьому змістовному балансі ірраціональної сенсорики та раціональної комбінаторики штучного інтелекту і машинного навчання, що є предметом означеної теми дослідження, запроваджуються алгоритми AI в ієрархічній її побудові, що здатні аналізувати мегавеликі обсяги трафіку та системно виявляти аномалії, які можуть сигналізувати про MITM-атаки. Відтак, технології UEBA (User and Entity Behavior Analytics) відстежують відхилення у поведінці користувачів.

З огляду на це, фізична безпека та апаратні методи захисту дають змогу запобігати MITM-атакам є не лише для кібербезпеки, а й для фізичного захисту апаратного забезпечення, що містить конфіденційну інформацію в умовах повоєнної України, особливо у стратегічно-критичних інфраструктурах, як прерогативи спецслужб. Саме за таких умов використання апаратних модулів безпеки (HSM) для шифрування, контролю фізичного доступу до мережевих пристроїв та впровадження апаратних токенів як частини двофакторної аутентифікації є ефективними рішеннями для зменшення ризику атак.

### **Математичне моделювання MITM-атак у воєнній стеганографії**

Для захисту мережевих інфраструктур можна застосовувати математичні моделі, такі як орієнтовані графи. Нехай система представляється графом  $G=(V, E)$  де  $V$  — це вузли (користувачі, пристрої), а  $E$  — зв'язки між ними. MITM-атака моделюється додаванням нових ребер зловмисником для перехоплення або зміни даних.

В означеній проблематиці варто застосовувати як п'ятизначну, десятизначну, так і 16-ти значну кодову інформацію на бітовій основі. Саме така ієрархія кодування та декодування є надто важливою в орієнтованому графі мережі. Адже в кожній ієрархічно обумовленій категорії орієнтованого графа мережі має

бути поруч із ймовірно хибними числовими знаками кодового програмування відповідна кількість вірогідних чисел в означеному програмуванні.

00000	0000000000	0000000000000000
10100	0100101001	1100010010000100

При цьому варто використовувати математичний метод індукції, що виражається формулою:  $n!(a_n+1)$

$v_i \in V$  – вузли, які представляють пристрої або сервери.

$e_{ij} \in E$  – орієнтовані ребра, що представляють передачу даних від вузла  $v_i$  до вузла  $v_j$ .

Таким чином, у вірогідному алгоритмі пріоритетності, якщо зловмисник перехоплює канал зв'язку, ми можемо нейромодельовати в системі генеративної розробки програмування - це додаванням нового ребра  $e_{zm}$ , де  $z$  – вузол зловмисника, а  $m$  – цільовий вузол. Ймовірність успішної MITM-атаки залежить від таких факторів:

$$P(\text{MITM}) = P(\text{Intercept}) \times P(\text{Decrypt}) \times P(\text{Modify})$$

де:

–  $P(\text{Intercept})$  – ймовірність перехоплення даних;

–  $P(\text{Decrypt})$  – ймовірність успішного дешифрування;

–  $P(\text{Modify})$  – ймовірність зміни даних без виявлення.

Застосування двофакторної аутентифікації знижує ймовірність атаки:

$$P(\text{MITM2FA}) = P(\text{MITM}) \times (1 - p_{2FA}).$$

Для моделювання можна використовувати криптографічні протоколи. Наприклад, при шифруванні симетричним та асиметричним методами:

$$c = E_{\text{asym}}(k) + E_{\text{sym}}(m)$$

де:  $c$  – зашифроване повідомлення,  $k$  – симетричний ключ,  $m$  – повідомлення.

Тому для контейнерів фіксованого розміру більш доцільним є використання методу псевдовипадкової перестановки (вибору) [8], зміст якого полягає в тому,

що генератор псевдовипадкових чисел (генератор ПВЧ) утворить послідовність індексів  $j_1, j_2, j_3$  і зберігає –  $k$ -й бітів повідомлення в пікселі з індексом  $j_k$  [10].

Нехай  $N$  – загальна кількість бітів (наймолодших) у наявному контейнері;  $P^N$  – перестановка чисел  $\{1, 2, \dots, N\}$ . Тоді, якщо в нас є для приховання конфіденційне повідомлення довжиною  $n$  бітів, то ці біти можна просто вмонтувати замість бітів контейнера  $P^N(1), P^N(2), \dots, P^N(n)$ .

Функція перестановки повинна бути псевдовипадковою, іншими словами, вона повинна забезпечувати вибір бітів контейнера приблизно випадковим чином. Таким чином, секретні біти будуть рівномірно розподілені у всьому бітовому просторі контейнера. Однак, при цьому індекс визначеного біта контейнера може з'явитися в послідовності більше одного разу і в цьому випадку може відбутися «перетинання» – перекручування вже вбудованого біта. Якщо кількість бітів повідомлення набагато менша кількості молодших бітів зображення, то ймовірність перетинання є незначною, і перекручені біти надалі можуть бути відновлені за допомогою коригувальних кодів.

На наш погляд, ймовірність одного перетинання оцінюється завдяки математичному моделюванню таким чином:

$$p \approx 1 - \exp\left[-\frac{I_M \cdot (I_M - 1)}{2 \cdot I_C}\right], I_M \ll I_C. \quad (1)$$

При збільшенні  $I_m$  і  $I_c = \text{const}$  дана ймовірність прагне до одиниці.

Для запобігання перетинань можна запам'ятовувати всі індекси використаних елементів  $B$ , і перед модифікацією нового пікселя виконувати попередню його перевірку на повторюваність. Також можна застосовувати генератори ПВЧ без повторюваності чисел. Останній випадок розглянемо детальніше.

Функція перестановки також залежить від секретного ключа  $K$ . При цьому генератор псевдовипадкової перестановки  $P_N$  – це функція, що для кожного значення  $K$  виробляє різні псевдовипадкові перестановки чисел  $\{1, 2, \dots, N\}$ .

Позначимо через  $P_K^N$  генератор перестановок з відповідним ключем  $K$ .

Якщо перестановка  $P_K^N$  захищена за обчисленням в силу її можливої складності використання, (тобто злам алгоритму вимагає не виправдано більших великих витрат обчислювальних ресурсів зловмисника), то можливість розкриття змісту або припущення самого тільки виду перестановок без володіння інформацією про секретний ключ  $K$  практично прирівнюється до нуля [47, с. 65].

Секретний генератор псевдовипадкової перестановки (генератор ПВП) може бути ефективно реалізований на основі генератора псевдовипадкової функції (генератор ПВФ), котрий, як і генератор ПВП, виробляє різні, так, що не підлягають передбаченню, і прогнозуванню алгоритми функції при кожному окремому значенні ключа; однак множина значень функцій не повинне прирівнюватися за множини її визначення. Генератор ПВФ легко реалізується із секретної хеш-функції  $H$  шляхом об'єднання аргументу  $i$  із секретним ключем  $K$  та взяття від результативного бітового рядка функції  $H$ .

$$F_k(i) = H(K_i),$$

де  $K_i$  – об'єднання (конкатенація) бітових рядків  $K_i$ ;  $f_k(i)$  – результативна псевдовипадкова функція від  $i$ , що залежить від параметра  $K$ .

У цьому контексті генератор Лубі (Luby) і Рекоффа (RescOFF) побудований у такий спосіб, а саме: запис виду  $a \oplus b$  має на увазі побітове додавання за модулем 2 аргументи  $a$  з аргументом  $b$ , причому результат додавання має ту ж розмірність, що і  $a$ .

Нехай  $i$  – рядок двійкових даних довжиною  $2I$ . Розділимо  $i$  на дві частини:  $x$  та  $y$  довжини  $I$  кожна, а ключ  $K$  на чотири частини:  $K_1, K_2, K_3, K_4$ . Тоді,

$$y = y \oplus f_{k_1}(x) = y \oplus H(K_1 \circ x);$$

$$x = x \oplus f_{k_2}(y) = x \oplus H(K_2 \circ y);$$

$$y = y \oplus f_{k_3}(x) = y \oplus H(K_3 \circ x);$$

$$x = x \oplus f_{k_4}(y) = x \oplus H(K_4 \circ y);$$

повернення в  $\circ x$ .

Для кожного значення ключа  $K$  алгоритм повертає псевдовипадкову перестановку із чисел  $\{1, \dots, 2^{2I}\}$ . Лубі й Рекофф показали, що запропонована перестановка є настільки ж секретною, наскільки й генератор ПВФ. Вони також запропонували простий алгоритм перестановки з  $\{1, \dots, 2^{2I+1}\}$ . Якщо значення функції  $f_k$  становить досить довгі бітові послідовності, той же ефект можна одержати, прийнявши, що  $y$  – перші  $I$  біти рядка  $i$ , а  $x$  – останні  $(I+1)$  біти.

Представлена вище конструкція дозволяє одержати перестановку  $P_K^{2^k}$  з  $\{1, \dots, 2^k\}$  для довільного  $K$ . Однак у випадку, коли кількість бітів контейнера становить  $N$ , виникає необхідність у перестановці  $P_K^N$  з  $\{1, \dots, N\}$ .

Перевага методу у методологічній матриці запобігання MITM атакам щодо стратегічних та цивільних інфраструктур полягає в тому, що існує можливість обмежитися тільки наявними для  $P_K^N$  аргументами. Нехай  $k = \lceil \log_2(N) \rceil$  (квадратні дужки означають округлення до найменшого цілого, що більше або дорівнює аргументу). Тоді  $2^{k-1} < N \leq 2^k$ . При цьому підраховуються значення  $P_K^{2^k}(1), P_K^{2^k}(2), \dots$  і з послідовності віддаляються будь-які числа, що перевищують  $N$ . Таким чином, одержують

значення  $P_K^{2^k}(1), P_K^{2^k}(2), \dots$  і з послідовності віддаляються будь-які числа, що перевищують  $N$ . Таким чином, одержують значення  $P_K^N(1), P_K^N(2), \dots$ . Помітимо, що це стає можливим, коли функція перестановки обчислена для значень аргументів які зростають, починаючи з одиниці. Отже, генератор ПВП  $P^N$  для довільного  $N$  може бути побудований на основі алгоритму Лубі й Рекоффа. Якщо ж  $N$  є складовим (як у випадку зображення), існує більше зручний спосіб побудови генератора ПВП. Наведений нижче алгоритм заснований на блоковому кодуванні з довільним розміром блоку [8]. Що знаходить конфіденційне застосування у цій методологічній матриці запобігання МІТМ-атакам, виходячи із воєнної стеганографії з критеріального огляду квантових симуляцій та космічної гіперспектроскопічності на експертній основі.

Кількість бітів контейнера повинна становити складене число із двох співмножників приблизно однакового порядку, тобто  $N = X \cdot Y$  для деяких  $X$  і  $Y$ .

У випадку, коли дані ховаються в НЗБ пікселей цифрового зображення, параметри  $X$  і  $Y$  є розмірами даного зображення. З метою будь-якого ворожого введення в оману, а також для одержання координат  $i$ -го пікселя зображення при прихованні біта повідомлення ( $i \in \{1, \dots, N\}$ ) необхідно виконати такі обчислення:

$$\begin{aligned} x &= (i, Y) + 1; \\ y &= \text{mod}(i, Y) + 1; \\ x &= \text{mod}(x + f_{k_1}(y), X) + 1; \\ y &= (y + f_{k_2}(x), Y) + 1; \\ x &= \text{mod}(x + f_{k_2}(y), X) + 1; \\ i &= (x, y) \text{ або } i = (x-1) \cdot Y + y, \end{aligned}$$

де  $(i, X)$  і  $\text{mod}(i, X)$  – функції, які повертають, відповідно, ціле й залишок від розподілу  $i$  на  $X$ . Інший варіант формули застосуємо у випадку, якщо масив зображення попередньо був розгорнутий у вектор (по рядках). Додаток одиниці необхідний при індексації елементів масиву зображення, починаючи з одиниці.

Перші два раунди алгоритму необхідні для того, щоб комбінаторно «розсіяти» біти приховуваного повідомлення серед найменш значущих бітів контейнера. При цьому, перший раунд надає випадковий характер  $J_c$  – координатам пікселя-контейнера, а другий  $y$  – координатам. Третій раунд необхідний для протидії атаці на відкритий (незашифрований) текст [47, с. 67].

У випадку використання тільки двох раундів, нехай  $i = (b-1) \cdot Y + a$ , а  $P_N^K(i)$  – значення перестановки. Якщо криптоаналітик здатний припустити значення  $a$  й може одержати пару «відкритий текст – кодований текст» ( $i' = (z-1) \cdot Y + a, P_N^K(i')$ ) для деякого  $z$ , то він здатний установити  $b$ .

Крок 1. Повідомлення, яке необхідно приховати:  $M := \ll @ \text{Колос} \gg$

Контейнер  $C$  – підмасив  $B$  синьої кольорової складової зображення. При цьому кількість бітів у повідомленні:  
 $L_M := \text{strlen}(M), L_M := 200$  бітів;  
 геометричні розміри контейнера:  
 $X := \text{rows}(C), X = 128$  пікселей;  
 $Y := \text{cols}(C), Y = 128$  пікселей;  
 $N := XY, N := 16384$ .

Крок 2. Для формування ключа використовуємо модуль, що дозволяє на підставі первинного ключа  $K_0 > 2$  сформувати вектор, що буде містити  $R$  пар ключів (кожна пара ключів буде використовуватися у відповідному раунді обчислення координат  $x$  і  $y$ ).

Крок 3. Вбудовування бітів повідомлення в псевдовипадкові пікселі контейнера виконаємо за допомогою модуля. На початку модуля масиву  $S$  привласнюються значення вихідного масиву  $C$ . Також виконується конвертування повідомлення зі строкового формату у вектор двійкових даних  $Mvec_{bin}$ . При кіберобчисленні прямокутних координат  $x$  і  $y$  використовується операція векторизації, що дозволяє поелементно скласти за модулем 2 двійкові вектори  $K$  і  $u$  (або  $x$ ). При цьому розмірність зазначених векторів повинна бути однаковою, для чого використовується функція *submatrix*.

Крок 4. На стороні що приймає у програмному забезпеченні повинні бути відомі первинний ключ  $K_0$  і масив кольоровості, у який виконувалося вбудовування ( $S$ ). З останнього виходять значення  $X, Y, N$ .

За таких умов алгоритми, описувані в даному пункті, впроваджують ЦВДЗн в множини вихідного зображення. Їх перевагою є те, що для впровадження ЦВДЗн нема потреби виконувати обчислювально-громіздкі лінійні перетворення зображень. Тому, ЦВДЗн впроваджується за рахунок квантових маніпуляцій (операцій як надшвидкого здійснення відповідного результату, в жодному разі непомітного ворогові) якскравість  $I(x, y) \in \{1, \dots, L\}$  або багатокольорними складовими  $(r(x, y), b(x, y), g(x, y))$ , а також алгоритму програмного забезпечення щодо виявлення, передбачення, запобігання та протидії можливих корупційних схем.

#### Дослідження MITM-атак

Поточні дослідження атак MITM зосереджені на дедалі більшій складності та доступності цих загроз, а також на заходах протидії їм. Основні напрямки дослідження включають:

Фішинг як послуга (PhaaS): ці набори інструментів демократизують атаки MITM,

роблячи їх доступними для менш досвідчених зловмисників. Імітуючи законні служби через проксі-сервери, ці атаки можуть викрасти облікові дані автентифікації, файли cookie сеансу та інші конфіденційні дані. Це створює значні ризики для підприємств, які покладаються на традиційні засоби безпеки.

Архітектури нульової довіри: дослідження підкреслюють застосування моделей нульової довіри для протидії загрозам MITM. Це передбачає впровадження повної перевірки TLS (Transport Layer Security) і надійних механізмів багатofакторної автентифікації, таких як FIDO2. Перехід від традиційної безпеки на основі VPN до архітектур на основі проксі має вирішальне значення для зменшення вразливостей.

III в атаці та захисті: Генеративні інструменти III все частіше використовуються для автоматизації та покращення виконання атак MITM, наприклад, шляхом кращого націлювання та імітації систем. І навпаки, штучний інтелект і машинне навчання також використовуються для виявлення аномалій і запобігання таким атакам.

*Нові вразливості протоколів.* Дослідження виявили слабкі місця в нових протоколах і системах зв'язку, зокрема тих, що використовуються в мережах IoT (Інтернет речей) і 5G. Для цього необхідно пом'якшити ці вразливості. Тому варто розробити більш безпечні методи шифрування та автентифікації.

З огляду на це, саме кібербезпека в критичній інфраструктурі: акцентує увагу на захисті основних систем, таких як фінансові мережі та хмарні сервіси, від перехоплення та злочинно-гібридних намірів маніпулювання даними на основі MITM.

*Дослідження сторонніх компаній MITM атак.*

Для цього необхідний такий алгоритм дій, як покрокова процедура, що полягає в наступному. Взяти характеристики URL-адрес фішингу облікових даних MITM

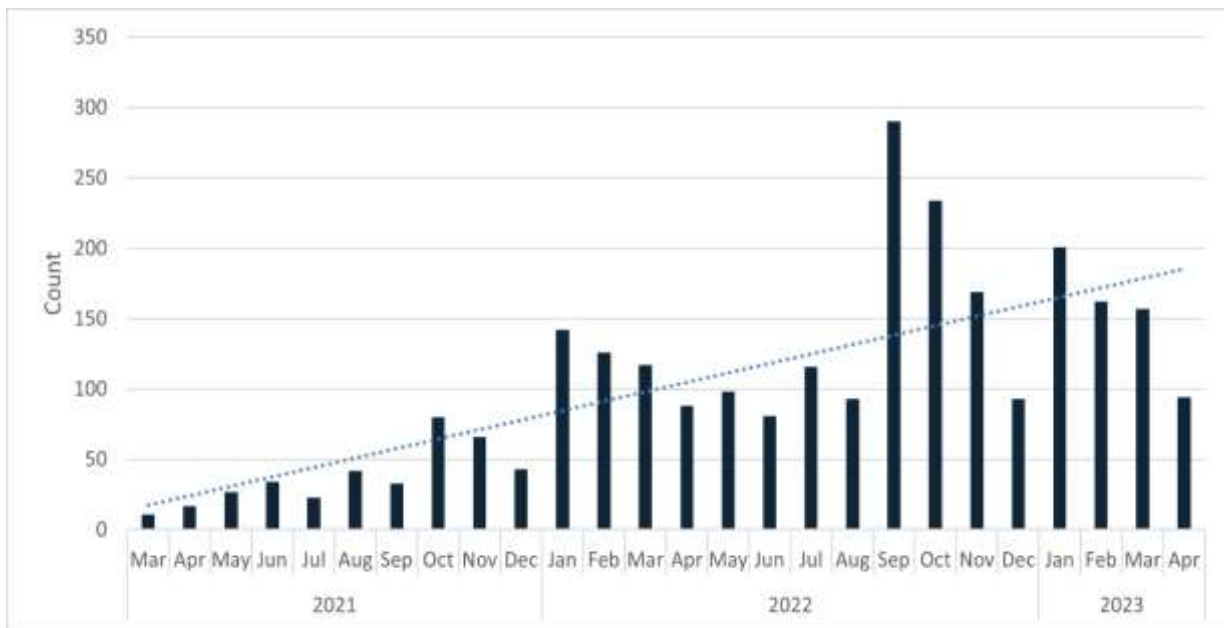


Рисунок 2 – Кількість фішингових кампаній типу «man-in-the-middle» на місяць

(описані далі в цій статті). Для цього варто окреслити порівняльний аналіз, а саме: зіставити їх із фішинговими кампаніями, виявленими в поштових скриньках клієнтів. Так, наприклад, Cofense Intelligence здійснювала метод спостережень. Проте, на наш погляд, варто звернути увагу на постійне зростання об'єму атак типу «людина посередині»[3] з метою збирання облікових даних початку 2021 року.

З огляду на це, на рисунку 2 показані основні сплески в січні та вересні 2022 року, за якими було необхідно важливі виправлення полідискретного (багатоточкового) характеру, що зберігають вихідну довгострокову траєкторію [1]. Крім того, сплески та кореляції (виправлення) можуть бути ритмодинамічно пов'язані – як циклічна обумовленість. Саме в них суб'єкти загроз розробляють, тестують та вдосконалюють можливості своїх наборів для фішингу MITM. Також існують численні інструменти з відкритим вихідним кодом (такі як evilginx2, CipherGinx та Muraena), які можуть надати суб'єктам загроз можливості MITM.

Отже, виявлено значну кількість цільових сторінок типу «зловмисник

посередині», що намагаються перехопити облікові дані Office 365 (рисунок 3). А, зі свого боку, Outlook і Amazon здійснюють подальшу покрокову процедуру із великим відривом. Адже більшість компаній, що спостерігаються, мають шкідливий URL, вбудований в тіло листа, а не у вкладення. При цьому, мало хто з вбудованих URL адресується безпосередньо до сервера man-in-the-middle. Оскільки значна кількість адрес проходить через одне або кілька перенаправлень URL, перш ніж досягти кінцевого URL, який фактично проводить атаку man-in-the-middle.

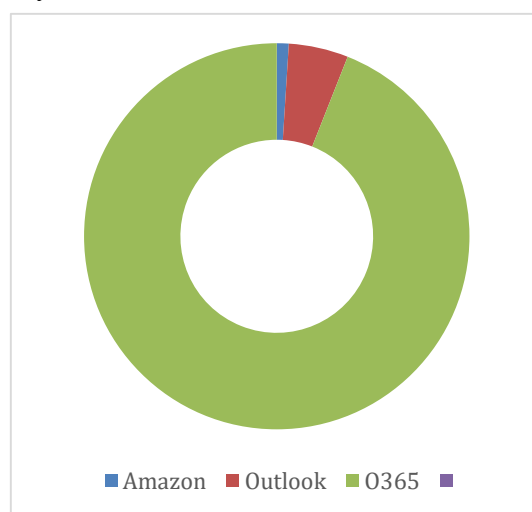


Рисунок 3 – Тип сторінок входу, що перехоплюються серверами типу man-in-the-middle

### Висновки

Обґрунтовано, що MITM-атаки залишаються значною загрозою для стратегічних і цивільних інфраструктур. З'ясовано, що впровадження сучасних методів захисту, таких як шифрування, 2FA, VPN та IDS на основі математичного моделювання та штучного інтелекту може значно зменшити ризики атак. Передбачено та прогнозовано, що подальші дослідження, а також впровадження інноваційних рішень забезпечать ефективний рівень кібербезпеки в майбутньому. При цьому варто окреслити системний аналіз щодо кіберстійкості на рівні інтелектуальної особи, правової держави та інформаційного суспільства знань. Адже в цьому напрямку в кіберсучасності повоєнної України вже здійснюється академічний рейтинг глобально-регіонального характеру наукової західноєвропейської традиції, оскільки така інтелектуальна традиція не одне вже покоління мобілізує найкращий інтелект з усього світу (AD - рейтинг).

### Список використаних джерел

1. Smith J. Man-in-the-Middle Attacks: An Overview and Prevention Strategies. *Cybersecurity Journal*. 2018.
2. Jones A. The Role of Encryption in Preventing MITM Attacks. *International Journal of Cryptography*. 2019.
3. Brown M. Critical Infrastructure Security: Lessons from Recent Attacks. *Security in Practice*. 2020.
4. Лісовський П. М., Лісовська Ю. П. Дискретна математика війни: кодера та декодер: навчальний посібник. Київ: Видавничий дім "Кондор", 2024. 112 с.
5. Лісовський П.М., Лісовська Ю.П. Воєнна стеганографія: квантова симуляція та космічна гіперспектроскопія: навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2024. 134 с.
6. Лісовський П.М., Лісовська Ю.П. Кібервійська як квантове програмне забезпечення інформаційного капіталу: монографія. Київ: Ліра-К, 2024. 210 с.

7. Gray T. Man-in-the-Middle Attacks in IoT Systems. *Springer Advances in Computing*. 2022.

8. White P. and Green L. The Role of Artificial Intelligence in Detecting MITM Attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020. DOI: [10.1109/TCYB.2020.1234567](https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.1234567)

9. Fernandez R. Advanced Threat Modeling Techniques for Mitigating MITM Attacks. Elsevier Computer Security Series. 2022.

10. Lee A., & Walker J. Ethical Hacking and Penetration Testing Guide. Auerbach Publications. 2021.

11. Johnson L. Network Defense and Countermeasures: Principles and Practices. Pearson. 2020.

### References

1. Smith J. Man-in-the-Middle Attacks: An Overview and Prevention Strategies. *Cybersecurity Journal*. 2018.
2. Jones A. The Role of Encryption in Preventing MITM Attacks. *International Journal of Cryptography*. 2019.
3. Brown M. Critical Infrastructure Security: Lessons from Recent Attacks. *Security in Practice*. 2020.
4. Lisovskyi P. M., Lisovska Yu. P. Diskretna matematika viiny: kodery ta dekoeder. Kyiv: Vydavnychiy dim "Kondor", 2024. 112 p. [in Ukrainian]
5. Lisovskyi P.M., Lisovska Yu.P. Voienna stehanohrafiia: kvantova symuliatsiia ta kosmichna hiperspektroskopiiia. Kyiv: Lira-K, 2024. 134 p. [in Ukrainian]
6. Lisovskyi P.M., Lisovska Yu.P. Kiberviiska yak kvantove prohranne zabezpechennia informatsiinoho kapitalu: monohrafiia. Kyiv : Lira-K, 2024. 210 p.
7. Gray T. Man-in-the-Middle Attacks in IoT Systems. *Springer Advances in Computing*. 2022.
8. White P. and Green L. The Role of Artificial Intelligence in Detecting MITM Attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020. DOI: [10.1109/TCYB.2020.1234567](https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.1234567)

9. Fernandez R. Advanced Threat Modeling Techniques for Mitigating MITM Attacks. Elsevier Computer Security Series. 2022.

10. Lee A., & Walker J. Ethical Hacking and Penetration Testing Guide. Auerbach Publications. 2021.

11. Johnson L. Network Defense and Countermeasures: Principles and Practices. Pearson. 2020.

**METHODOLOGICAL MATRIX FOR  
PREVENTING MITM ATTACKS IN  
STRATEGIC AND CIVIL  
INFRASTRUCTURES**

A. A. Shkitov<sup>1\*</sup>, N. G. Buzoveria<sup>2</sup>,  
O. A. Stadnichenko<sup>3</sup>, K. M. Mazhuga<sup>3</sup>,  
T. V. Humeniuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Open International University of Human Development  
“Ukraine”; 23 Lvivska St., Kyiv, 03115, Ukraine;  
e-mail: *office@uu.ua*

<sup>2</sup>Ivano-Frankivsk National Technical  
University of Oil and Gas;  
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine;  
e-mail: *nadiia.shyrmovska@nung.edu.ua*

<sup>3</sup>Ukrainian Institute of Plant Variety Examination;  
15 Henerala Rodymtseva Str, 15, Kyiv, 03041,  
Ukraine; e-mail: *sops@sops.gov.ua*

## ВИМОГИ ДО ПОДАНИХ МАТЕРІАЛІВ

---

Рукописи статей, що подаються до університетських науково-технічних журналів, повинні бути актуальними, зрозумілими, повноцінними, виконаними на високому науково-технічному рівні і відповідати нафтогазовому профілю, містити наукову і практичну новизну, викликати інтерес у читачів наукової спільноти.

### **Рекомендації щодо написання статті:**

Стаття не повинна містити елементів плагіату (включаючи перевидання статті або її частин, подання одночасно в декілька журналів, використання текстів та ілюстрацій без дозволу їх правовласника) і самоплагіату.

Стаття має бути написана грамотно без орфографічних і граматичних помилок.

Стаття повинна бути завершеною, не фрагментарною, логічною, спрямованою на вирішення конкретних цілей і задач нафтогазової проблематики.

**Стаття повинна висвітлювати важливі регіональні дослідження, які не можуть бути проведені в іншій місцевості і відображають конкретні географічні, кліматичні, соціально-економічні проблеми.**

Стаття здатна як доповнити і розширити бази Scopus і Web of Science, так і зробити новий внесок у нафтогазову галузь науки, сформувані нові дискусійні теми, відкрити нові перспективи співпраці в науковій галузі.

Авторам рекомендується перевіряти кінцеві варіанти статті на помилки, перш ніж повернути виправлений рукопис до редакції, оскільки врахування запізнених поправок не гарантоване.

Відповідальність за зміст статті і коректність викладеного матеріалу несе автор.

До редакції стаття подається он-лайн, після попереднього узгодження тематики статті з проблематикою журналу:

<https://nv.nung.edu.ua> – журнал: "Науковий вісник ІФНТУНГ",

<https://rrngr.nung.edu.ua> - "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ",

<https://nge.nung.edu.ua> - "Нафтогазова енергетика",

<https://mpky.nung.edu.ua> - журнал "Методи та прилади контролю якості",

<https://eung.nung.edu.ua> - журнал "Науковий вісник ІФНТУНГ. Серія: Економіка та управління в нафтовій і газовій промисловості";

<https://ogpe.nung.edu.ua> – журнал «**Journal of Hydrocarbon Power Engineering**»;

<https://ebzr.nung.edu.ua> – журнал «Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування».

Електронна пошта редакції: [redntv@nung.edu.ua](mailto:redntv@nung.edu.ua)

Стаття повинна бути структурована за такими пунктами:

1. **Назва статті** відтворює її зміст та привертає увагу наукової спільноти, в тому числі міжнародної. Містить не більше 12 слів.
2. **Кількість авторів** – не більше 6 (причому не більше 4 з однієї організації).
3. **Анотація** викладена в одному абзаці (не поділяється на підрозділи), зрозуміла, містить короткий опис проведених досліджень, розкриває основні результати роботи; ціль статті сформульовано коректно.  
Обсяг анотації разом із ключовими словами - не менш як 1800 знаків (українською та англійською).
4. **Ключові слова** конкретизують інформацію про дослідження, але не узагальнюють її. Складаються з 3-6 слів, словосполучень, відокремлених за допомогою крапки з комою, не повторюються в назві статті, відповідають змісту роботи.
5. **Вступ** дає змогу оцінити сучасний стан проблеми на світовому рівні. Завершується вступ формулюванням **мети роботи** – «виявити...», «охарактеризувати...», «з'ясувати...».
6. **Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій**, в яких започатковано вирішення проблеми і на які посилається автор.
7. **Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми**, якій присвячується стаття.
8. **Формулювання цілей статті** (постановка задачі і методів досліджень, що розглядаються).
9. **Висвітлення основного матеріалу дослідження** з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Розділ дає змогу побачити, що в дослідженнях виключені всі можливі джерела помилок, автор володіє інформацією про всі чинники, що впливають на результат.

Кількість дослідів повинна бути достатньою, об'єм вибірок має відповідати аналогічним дослідженням, опублікованим в міжнародних наукових виданнях. Дослідні дані обробляють коректними статистичними методами (перевагу надавати якомога сучаснішим багатомірним). Аналіз результатів містить достатнє статистичне обґрунтування і відповідає загально визначеним нормам нафтогазової галузі.

10. **Висновки** з проведеного дослідження (наукова новизна, теоретичне і практичне значення):
  - лаконічні, конкретні, відповідають меті і назві статті;
  - дослівно не дублюються у всіх мовних версіях анотацій;
  - не починаються «черговою фразою» (напр., «В результаті проведених досліджень були отримані такі...»);
  - міститься нова інформація, відсутнє перефразування будь яких розділів статті;
  - аргументи логічні і структуровані, дані статті підтверджують і обґрунтовують висновки;
  - висвітлюють перспективи подальшої роботи у даному напрямку;
  - відображають те, як результати корелюють з очікуваннями і більш ранніми дослідженнями. У висновках вказано чи стаття підтверджує чи спростовує вже існуючі теорії і як дослідження вплинуло на процес збагачення наукових знань.
11. **Список використаних джерел** слід оформити відповідно до правил для авторів, заснованих на ДСТУ 8302:2015 "Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання». Також **необхідно подати REFERENCES транслітерацію** літератури

Ресурс для транслітерації з української мови - <http://ukrlit.org/transliteratsiia/>

**Рекомендований обсяг рукопису статті - від 7 стор.**

**Електронний варіант статті повинен задовольняти таким вимогам:**

**1. Стаття набирається** у редакторі Microsoft Word на аркуші формату 210x297 мм, поля (мм): верхнє – 20, нижнє – 25, ліве – 30, праве – 15.

**2. Порядок набору:**

**УДК** (Times New Roman (Cyr), кегль 11, без абзацного відступу, вирівнювання – зліва).

**Назва статті** (Arial (Cyr), кегль 14, bold, прописом, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 12 пт).

**Ініціали, прізвище автора (співавторів)** (Times New Roman (Cyr), кегль 11, bold italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру). Прізвище відповідального за подання статті автора повинно бути позначене зірочкою.

**Назва організації, її повна поштова адреса, адреса електронної пошти** (Times New Roman (Cyr), кегль 11, italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивка знизу – 12 пт). Якщо автори статті представляють декілька організацій, то необхідно для кожної організації вказати її назву, повну поштову адресу і адресу електронної пошти.

**Анотації українською та англійською мовами** – кегль (менший від основного тексту статті) – 10, інтервал - 1,0. Об'єм анотації - 1800 знаків кожною мовою.

**Основний текст** набирається таким чином:

2.1. Стил "звичайний", гарнітура - Times New Roman (Cyr), кегль 12, абзацний відступ – 0,75 см, міжрядковий інтервал – 1,0.

2.2. Відбивки по тексту не використовуються за винятком підрозділів статті (підрозділи, підпункти і т. п. відокремлюються відбивками "перед" – 9, "після" – 6).

**3. Для набирання формул** використовується редактор формул **Math Type (версії не нижче 6.x або Equation v. 3.0)** Стил: **Text** – Times New Roman (Cyr), **Function** – Times New Roman (Cyr), italic, **Variable** - Times New Roman (Cyr), italic, L.C.Greek – Symbol, italic, **Symbol** – Symbol, italic, **Matrix/Vector** - Times New Roman (Cyr), **Number** - Times New Roman (Cyr). Розміри: **Full** – 11, **Subscript/Superscript** – 8, **Sub-Subscript/Superscript** – 8, **Symbol** – 14, **Sub-Symbol** – 10.

**Забороняється використовувати вбудований у MS Office версій 10 і вище редактор формул!**

**Для наочності рекомендується формули відокремлювати відбивками зверху і знизу – 6 пт.**

**Формули компонуються так, щоб вони вміщалися в колонку шириною 80 мм!!!**

**4. Таблиці** повинні бути складені лаконічно, зрозуміло і містити мінімальні відомості, необхідні для ілюстрування суті статті. Таблиці не повинні дублювати результати, представлені в інших місцях рукопису (наприклад, у вигляді графіків).

**Назва таблиці:** Times New Roman (Cyr), кегль 11, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 6 пт.

**Таблиці компонуються так, щоб вони вміщалися в колонку шириною 80 мм або 165мм!!!**

5. Ілюстрації до статей (схеми, графіки, діаграми) повинні бути виконані у растровому (векторному) форматах (BMP, TIF, PCX, JPG, GIF, CDR) і додаватися окремим файлом.

**Забороняється використовувати графічний редактор MS WORD!!!**

Ілюстрації типу фотографій повинні бути відскановані з роздільною здатністю не менше 400 dpi і/або додаватися в оригіналі.

Усі рисунки, графіки і фотографії можуть бути чорнобілими, кольоровими або півтоновими.

**Ілюстрації, перескановані з періодики та накреслені вручну, не приймаються!!!**

Підписи до ілюстрацій: Times New Roman (Сур), кегль 10, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру. Написи в ілюстраціях виконуються гарнітурою Arial.

Забороняється використовувати аббревіатуру в назвах.

6. Використані автором літературні джерела, на які є посилання у тексті, наводяться у кінці статті загальним списком у порядку згадування. До нього слід включати лише джерела, на які є посилання у статті. У тексті порядковий номер (згідно списку) літературного джерела, на яке посилаються, подається у квадратних дужках, наприклад, [4]. Обов'язково оформити REFERENCES.

**Додатково до тексту статті додається файл з довідкою про авторів (для присвоєння індексу DOI кожній публікації).**

**ДОВІДКА ПРО АВТОРА**

1. Автор (укр. і англ.) \_\_\_\_\_  
(Прізвище, ім'я, по батькові)
2. Науковий ступінь \_\_\_\_\_
3. Вчене звання, ID ORCID \_\_\_\_\_
4. Місце роботи (повна назва організації та адреса укр. і англ.) \_\_\_\_\_
5. Контактний номер телефону \_\_\_\_\_
6. Електронна пошта \_\_\_\_\_
7. Поштова адреса з індексом (на яку необхідно направити примірник збірника наукових праць) \_\_\_\_\_
8. Назва публікації (укр. і англ.) \_\_\_\_\_
9. Анотації двома мовами з ключовими словами (укр., англ.) \_\_\_\_\_
10. Дата подання статті до редакції \_\_\_\_\_

Якщо авторів декілька, довідку можна оформити одну з чітким вказанням прізвищ і місця роботи українською і англійською мовами.

Рукописи, які не враховують наведені вище вимоги, повертаються автору без розгляду по суті. Датою надходження рукопису статті в редакцію вважається дата надсилання її кінцевого варіанта.