

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ

№ 1 (52) 2024

Видається з 1997 р.

Засновник: Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу

Видавництво: Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу

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 *Джегала 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 *Пасека 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 *Смоловик Л. Р.*

д-р техн. наук *Стрілецький Ю. Й.*

д-р техн. наук *Сучков Г. М.*

д-р техн. наук *Учанин 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: mni@nung.edu.ua

<http://www.nung.edu.ua>

Редактори

Н. Р. Стецюк, О. О. Роспона

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

Т. В. Кепещук, Л. Б. Пастушин

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ
ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН..... 5

А. О. Колесниченко, С. Ю. Плєснецов, Ю. О. Плєснецов

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ТА СИСТЕМ ДЛЯ
АВТОМАТИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ 15

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

О. І. Курандо, Ю. О. Плєснецов, С. Ю. Плєснецов

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛУ
НА ЯКІСТЬ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ..... 26

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

В. І. Маковишин, М. М. Демчина

ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ПАРОФАЗНИХ КОНДЕНСАТІВ SnTe ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ
ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ..... 34

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

О. Ю. Севєрін, Ю. О. Плєснецов, С. Ю. Плєснецов

ВПЛИВ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ПРОФІЛЮВАННЯ НА ЯКІСТЬ
ГНУТИХ ПРОФІЛІВ..... 41

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ КОМПЛЕКСИ

В. А. Надточій, А. П. Бурунін

ЗАДАЧІ СТВОРЕННЯ ТА КРИТЕРІЇ УПРАВЛІННЯ БЕЗЕКАПЖНОГО
НАДВОДНОГО КАТЕРА ДЛЯ ПРИРОДООХОРОННИХ МІСІЙ
НА МІЛКОВОДНИХ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЯХ..... 53

Б. О. Лібус, А. М. Стеценко

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЛІНІЇ НАНЕСЕННЯ ПОРОШКОВОГО
ПОКРИТТЯ..... 66

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ, ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТА ДИСКРЕТНІ СТРУКТУРИ

М. І. Горбійчук, І. С. Єднак

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ ПРОЦЕСУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ СЕПАРАЦІЇ 74

Т. В. Василюшин

СЛАБКΟΣИΜΕΤΡΙЧНІ ЛІНІЙНІ НЕПЕРЕРВНІ ФУНКЦІОНАЛИ НА ПРОСТОРІ АБСОЛЮТНО СУМОВНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ..... 89

М. М. Попов, О. Г. Фотій

АПРОКСИМАЦІЯ ВУЗЬКИХ ОПЕРАТОРІВ НА ПРОСТОРІ L_1 ОПЕРАТОРАМИ З ОДНОВИМІРНИМ ОБРАЗОМ 94

В. В. Кравців

СПЕКТР АЛГЕБРИ БЛОЧНО-СИΜΕΤΡΙЧНИХ АНАЛІТИЧНИХ ФУНКЦІЙ НА ПРОСТОРІ $\ell_1 \oplus \ell_\infty$ 98

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

В. М. Хода, О. А. Стадніченко, С. С. Некрасов, М. О. Рожков, Н. Г. Бузоверя

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА ІОТ-СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТОКАРНИМ ВЕРСТАТОМ..... 102

І. С. Яковин, Р. Т. Красняк, А. А. Шкітов, Р. П. Томашівський

ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ ДАТАСЕТІВ ДЛЯ НАВЧАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ 115

О. В. Мойсєєнко

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ, НАВЧЕНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЕЙ ЗМАГАЛЬНИХ АТАК..... 121

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ 129

METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL

№1 (52) 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. Dzhalo 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 Technical Sc. 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. Osiievskiy S. V.

Cand. of Technical Sc. Pasiaka 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. Smolovyk L. R.

Dr. of Technical Sc. Striletskiy 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

Dr Sc., 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: mni@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

T. V. Kepeshchuk, L. B. Pastushchyn

METHODOLOGICAL ASPECTS OF TOOL CALIBRATION MEASURING TECHNIQUES OF GEOMETRIC QUANTITIES.....5

A. O. Koliesnychenko, S. Yu. Pliesnetsov, Yu. O. Pliesnetsov

REVIEW OF MODERN TOOLS AND SYSTEMS FOR AUTOMATIC CALIBRATION OF EQUIPMENT 15

MEASUREMENT OF PHYSICAL AND MECHANICS PARAMETERS OF SUBSTANCES

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

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DEFORMATION STRENGTHENING OF METAL ON THE QUALITY OF ROLLED SHAPES 26

METHODS AND DEVICES OF FLOW MEASUREMENT OF LIQUID AND GASEOUS PHASES

V. I. Makovyshyn, M. M. Demchyna

ENHANCEMENT OF THERMOELECTRIC PROPERTIES OF VAPOR-PHASE CONDENSATES SnTe USING AI METHODS 34

METHODS AND DEVICES FOR THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS CONTROL

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

INFLUENCE OF HIGH-SPEED PROFILING MODE ON THE QUALITY OF BENDED PROFILES 41

AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED NON-DESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGIES

V. A. Nadtochii, A. P. Burunin

TASK FOR CREATION AND CRITERIA FOR CONTROL OF UNCREWED SURFACE BOAT FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION MISSIONS IN SHALLOW SEAS.....53

B. O. Libus, A. M. Stetsenko

AUTOMATION OF POWDER COATING LINE 66

MATHEMATICAL MODELING, COMPUTATIONAL METHODS, OPTIMAL CERULATION AND DISCRETE STRUCTURES

<i>M. I. Horbiychuk, I. S. Yednak</i> MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMIC PROCESS OF LOW-TEMPERATURE SEPARATION	74
<i>T. V. Vasylyshyn</i> WEAKLY SYMMETRIC LINEAR CONTINUOUS FUNCTIONALS ON THE SPACE OF ABSOLUTELY SUMMABLE SEQUENCES	89
<i>M. M. Popov, O. G. Fotii</i> APPROXIMATION OF NARROW OPERATORS ON THE SPACE L_1 BY RANK ONE OPERATORS	94
<i>V. V. Kravtsiv</i> SPECTRUM OF THE ALGEBRA OF BLOCK-SYMMETRIC ANALYTICAL FUNCTIONS IN SPACE $\ell_1 \oplus \ell_\infty$	98

COMPUTER TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

<i>V. M. Khoda, O. A. Stadnichenko, S. S. Nekrasov, M. O. Rozhkov, N. G. Buzoveria</i> COMPUTERIZED IoT-SYSTEM FOR CONTROL OF LATHE.....	102
<i>I. S. Yakovyn, R. T. Krasnyak, A. A. Shkitov, R. P. Tomashivskyi</i> DATASETS PREPARATION FEATURES FOR TRAINING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS	115
<i>O. V. Moiseienko</i> RESEARCH ON THE STABILITY OF NEURAL NETWORKS TRAINED USING COMPETITIVE ATTACK MODELS	121
REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF ARTICLES.....	129

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 681.21.088

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-5-14

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Т. В. Кепещук, Л. Б. Пастуцин

*Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації»; вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, 76007, Україна;
e-mail: ktv.metr77@gmail.com*

Метою даної роботи є розроблення процедури калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) геометричних величин, зокрема мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень (індикаторів), що передбачає, серед іншого, складання модельного рівняння (математичної моделі), формування бюджету та оцінювання невизначеності результатів вимірювання. Забезпечення єдності та метрологічної простежуваності результатів вимірювання – одне з основних завдань калібрувальних лабораторій під час калібрування засобів вимірювальної техніки. Калібрування засобів вимірювальної техніки здійснюється відповідно до методик калібрування. Впровадження міжнародних документів, що регламентують акредитацію та діяльність калібрувальних лабораторій передбачає можливість цими лабораторіями розробляти власні (нестандартизовані) методики калібрування засобів вимірювальної техніки з подальшою їх валідацією (оцінюванням придатності до застосування). Якщо замовник не вказує метод (методику), який необхідно застосовувати під час калібрування засобу вимірювальної техніки, то рекомендується застосовувати відповідні методи (методики), опубліковані у міжнародних, регіональних чи національних стандартах, або видані авторитетними технічними організаціями, або видані у відповідній науковій літературі чи журналах, або ті, що зазначаються виробником обладнання. У роботі наведено методи та засоби, процедуру проведення калібрування мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень, визначення метрологічних характеристик зазначених засобів вимірювальної техніки, складання математичної моделі, формування бюджету та оцінювання невизначеності вимірювання за результатами калібрування. Наведений матеріал надає практичні рекомендації калібрувальним лабораторіям щодо розроблення нестандартизованих методик калібрування засобів вимірювальної техніки геометричних величин, зокрема мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень.

Ключові слова: засіб вимірювальної техніки, мікрометр, індикатор лінійних переміщень, калібрувальна лабораторія, методика калібрування, невизначеність вимірювань.

The purpose of this work is to develop a procedure for calibrating measuring instruments (MI) of geometric quantities, in particular micrometers and linear displacement indicators (indicators), which involves, among other things, compiling a model equation (mathematical model), forming a budget and assessing the uncertainty of measurement results. Ensuring the unity and metrological traceability of measurement results is one of the main tasks of calibration laboratories during the calibration of measuring instruments. Calibration of measuring instruments is carried out in accordance with calibration methods. The introduction of international documents regulating the accreditation and activities of calibration laboratories provides for the possibility for these laboratories to develop their own (non-standardized) methods for calibrating measuring instruments with their subsequent validation (assessment of suitability for use). If the customer does not specify the method (methodology) that must be used during the calibration of a measuring instrument, it is recommended to use the appropriate methods (methodologies) published in international, regional or national standards, or issued by authoritative technical organizations, or published in relevant scientific literature or journals, or those specified by the equipment manufacturer. The work provides methods and means, the procedure for calibrating micrometers and linear displacement indicators, determining the metrological characteristics of the specified measuring instruments, compiling a mathematical model, forming a budget and assessing the measurement uncertainty based on the calibration results. The material provides practical recommendations to calibration laboratories on the development

of non-standardized methods for calibrating measuring instruments of geometric quantities, in particular micrometers and linear displacement indicators.

Keywords: measuring instrument, micrometer, linear displacement indicator, calibration laboratory, calibration method, measurement uncertainty.

Вступ

Забезпечення єдності та метрологічної простежуваності результатів вимірювання – одне з основних завдань калібрувальних лабораторій під час калібрування засобів вимірювальної техніки.

Відповідно до положень Закону України «Про метрологію і метрологічну діяльність» [1], калібруванню в добровільному порядку можуть підлягати засоби вимірювальної техніки, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології. Калібруванню також підлягають вторинні та робочі еталони.

Загальні вимоги щодо компетентності, неупередженості та стійкого функціонування калібрувальних лабораторій визначаються національним стандартом ДСТУ EN ISO/IEC 17025 [2], який є ідентичним європейському та міжнародному документу EN ISO/IEC 17025:2107 та ISO/IEC 17025:2107. Окрім цього, акредитовані калібрувальні лабораторії при провадженні своєї діяльності також повинні керуватися міжнародними документами: EA-4/02 М, ІЛАС-G8:09, ІЛАС-P10:07, ІЛАС P14:01, ІЛАС-P14:09 [3, 4, 5, 6, 7] та документами Національного агентства з акредитації України: ЗД-08.00.09, ЗД-08.00.29, ІН-08.02.05 [8, 9, 10].

Калібрування засобів вимірювальної техніки здійснюється відповідно до методик калібрування. Згідно з ДСТУ EN ISO/IEC 17025 якщо замовник не вказує метод (методику), який необхідно застосовувати під час калібрування ЗВТ, рекомендується застосовування відповідних методів (методик), що опубліковані у регіональних, міжнародних або національних стандартах, які видані авторитетними технічними організаціями, у відповідній науковій літературі, журналах або зазначені виробником обладнання. Окрім цього, відповідно до

положень вказаного стандарту калібрувальні лабораторії можуть розробляти власні (нестандартизовані) методики калібрування засобів вимірювальної техніки з подальшою їх валідацією (оцінюванням придатності до застосування).

На даний час в Україні для більшості еталонів, засобів вимірювальної техніки відсутні методики калібрування, що встановлені у національних стандартах. Тому досить актуальним є питання щодо розроблення таких методик.

Мета роботи - розроблення процедури (типової методики) калібрування засобів вимірювальної техніки геометричних величин, зокрема мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень, що передбачає, серед іншого, складання математичної моделі, формування бюджету та оцінювання невизначеності результатів вимірювання.

Основний текст статті

У ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» розроблені методики калібрування ЗВТ геометричних величин, зокрема штангенінструменту, мікрометрів, індикаторів лінійних переміщень, мікроскопів, нутромірів, кутомірів та ін. Вказані методики розроблені з урахуванням вимог EA-4/02 М (в частині процедури оцінювання невизначеності вимірювань), пройшли апробацію, валідацію (оцінюванням придатності до застосування) та застосовуються для калібрування ЗВТ геометричних величин. Основними операціями, які наведені у методиках калібрування, є зовнішній огляд, опробування, визначення метрологічних характеристик ЗВТ, складання математичної моделі вимірювань, опрацювання результатів калібрування та оцінювання невизначеності вимірювань [11].

Процедуру калібрування штангенінструменту, складання модельного рівняння (математичної моделі) вимірювань, формування бюджету та оцінювання невизначеності вимірювань наведено в [11].

Розглянемо основні операції при калібруванні мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень, що можуть бути оснащені цифровим відліковим пристроєм.

Перед проведенням калібрування проводиться контроль умов калібрування. Температура повітря в приміщенні повинна бути $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, відносна вологість повітря від 40% до 75%, атмосферний тиск від 93325 Па до 103991Па; зміна температури не повинна перевищувати $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ за 1 годину. У приміщенні, де виконуються калібрування ЗВТ геометричних величин, не повинно бути повітряних та теплових потоків, а також вібрацій.

Перед проведенням калібрування еталонне та допоміжне обладнання для калібрування повинні бути приведені в робочий стан відповідно з експлуатаційними документами і витримані протягом не менше чотирьох годин на робочому місці. Мікрометри, що підлягають калібруванню, та міри довжини кінцеві плоскопаралельні (еталонні засоби) необхідно брати за допомогою рукавичок або теплоізольованої серветки.

При зовнішньому огляді мікрометрів повинні бути відсутніми: сколи, тріщини і забої на вимірювальних поверхнях та інших дефекти, які погіршують експлуатаційні характеристики і перешкоджають відліку показів.

Під час опробування мікрометрів перевіряють кілька важливих характеристик, які забезпечують точність і надійність роботи інструмента. Зокрема, перевіряють плавність переміщення барабана мікрометра вздовж «стебла», щоб забезпечити рівномірність руху без ривків і заїдань. Також оцінюють відсутність тертя барабана об «стебло», що може призводити до пошкоджень або неточностей у вимірюваннях.

Додатково тестують плавність переміщення мікрометричного гвинта, що є критичним для точного регулювання зазору. У разі наявності стопорного пристрою перевіряють, чи мікрометричний гвинт залишається нерухомим після його закріплення стопорним гвинтом. Завершальним етапом є перевірка правильності установки нульових показів мікрометра, що є основою для точності вимірювань

Для мікрометрів з цифровим відліковим пристроєм перевіряються:

- якість індикації показів мікрометра - індикація повинна бути чіткою, не мати розривів і бути рівномірно заповненою;

- відсутність на дисплеї мікрометра дефектів, що перешкоджають чи спотворюють покази.

Під час зовнішнього огляду індикаторів необхідно забезпечити відповідність засобу вимірювання таким критеріям:

1. Стан зовнішнього вигляду:

- Елементи шкали повинні бути чітко видимі, без будь-яких ознак пошкоджень або спотворень, що можуть ускладнювати зчитування даних.

- Матеріал, що закриває циферблат (наприклад, скло чи інший прозорий матеріал), повинен бути цілим, без тріщин, сколів чи інших дефектів.

- Пристрій для суміщення нульового штриха шкали зі стрілкою має функціонувати коректно та забезпечувати точне налаштування.

- Вказівник кількості обертів стрілки має бути в задовільному стані, без механічних пошкоджень, що можуть впливати на його функціональність.

2. Стан поверхні індикатора:

- Зовнішня поверхня повинна бути чистою, без іржі, бруду або глибоких подряпин, які могли б вплинути на точність вимірювань або ускладнити калібрування пристрою.

- Шкала повинна мати чітко нанесені поділки та цифрові позначки, які не повинні мати розривів, затирань чи інших

пошкодженнь, що можуть завадити зчитуванню результатів.

Опробування індикаторів включає наступні етапи:

3. Перевірка вимірювального стержня:

- Проводиться оцінка перевищення загального ходу вимірювального стержня відносно його робочого ходу. Вимірювальний стержень повинен мати відповідність у своїх рухах.

- Стрілка індикатора має повністю перекидатися короткі штрихи шкали, забезпечуючи точне відображення значень.

- При вільному переміщенні вимірювального стержня або його різкій зупинці стрілка не повинна здійснювати небажаних проворотів, що можуть вплинути на точність показників.

4. Робота стрілки:

- У крайніх положеннях подвійного ходу вимірювального стержня стрілка повинна переходити за вісь симетрії індикатора.

- Оцифрування шкали вказівника обертів має відповідати прямому ходу вимірювального стержня.

5. Оцінка точності:

- Перевіряється можливість суміщення стрілки з будь-якою поділкою шкали. При цьому не допускається зміщення стрілки з устанавленого положення.

- Стрілка не повинна відхилятися від напрямку осі вимірювального стержня при встановленні індикатора за вказівником обертів на будь-якому числі повних обертів.

6. Додаткові перевірки для цифрових індикаторів:

- Оцінюється справність пристрою «обнулення». Пристрій має забезпечувати коректне встановлення показників на нуль без збоїв чи затримок.

Загальні вимоги до функціональності:

Робота пристрою має бути плавною, без ривків, заїдань чи інших дефектів, які можуть порушити точність вимірювання або знизити зручність експлуатації.

Під час калібрування мікрометрів визначаються основні метрологічні характеристики, зокрема вимірювальне

зусилля, відхилення від площинності та паралельності вимірювальних поверхонь, відхилення показів, а також формується бюджет і оцінюється невизначеність результатів вимірювання.

Вимірювальне зусилля визначається за допомогою динамометра, який встановлюють між вимірювальними поверхнями мікрометра. Потім вимірювальні поверхні підводять, використовуючи пристрій для створення контрольованого зусилля, після чого знімають показання за шкалою динамометра. Відхилення від площинності вимірювальних поверхонь оцінюють інтерференційним методом із використанням плоскої скляної пластини, яку накладають на контрольовану поверхню. Досягають такого контакту, за якого спостерігається мінімальна кількість інтерференційних смуг. Величина відхилення визначається за числом інтерференційних смуг, причому відлік проводять, відступивши не менше ніж на 0,5 мм від краю вимірювальної поверхні.

На рис. 1, а) смуги, а і б обмежені колами, при цьому контакт поверхні відбувається в точці а. Коло г не береться до уваги, оскільки воно розташоване менше як 0,5 мм від краю поверхні. На рис. 1, б) контакт зі скляної пластини з вимірювальною поверхнею мікрометра відбувається в центральній точці, вимірювальна поверхня являє собою неправильну сферу з різними радіусами кривизни поверхні в перетинах Х-Х і У-У. Контакт поверхні відбувається в точці а, інтерференційна смуга б вважається першою, а смуги д і б приймаються за одну смугу, оскільки при великому розмірі вимірювальної поверхні вони б замкнулися. Смуги г і е до уваги не беруть, оскільки вони розташовані менше як 0,5 мм від краю поверхні. На рис. 1, в) вимірювальна поверхня являє собою циліндр. Контакт поверхні виконується в лінії а, в цьому випадку смуги витягуються в лінії, і кожна пара ліній б-д, в-г, ж-е вважаються за одну смугу, а смуга к до уваги не береться.

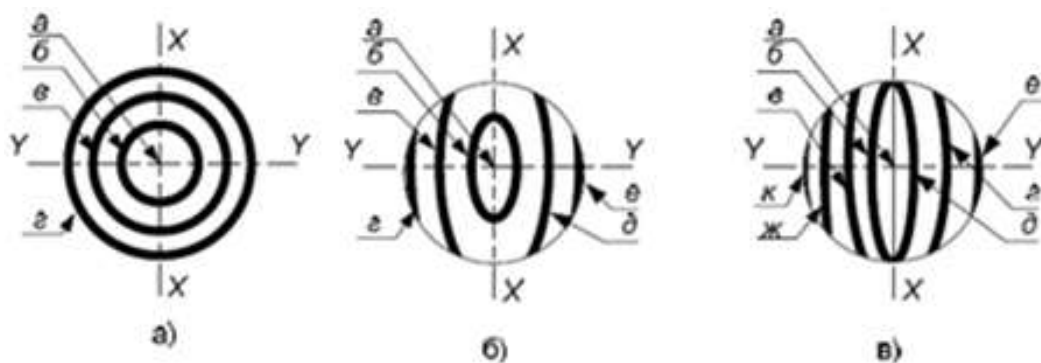


Рисунок 1 – Вимірювання відхилення від площинності вимірювальних поверхонь мікрометра

У випадку, коли по обидві сторони від точки (лінії) контакту буде спостерігатися різна кількість інтерференційних смуг, то відлік смуг виконується по тій стороні де їх більше.

Відхилення від паралельності вимірювальної поверхні мікрометра визначається за допомогою мір довжини кінцевих плоскопаралельних, розміри яких відрізняються один від одної на значення, яке відповідає $1/4$ обороту мікрометричного гвинта. Плоскопаралельна кінцева міра довжини послідовно встановлюється між вимірювальними поверхнями в положенні 1,2,3,4 на відстані b від краю вимірювальної поверхні, як показано на рис. 2, і підводяться вимірювальні поверхні мікрометра при використанні пристрою, що забезпечує вимірювальне зусилля.

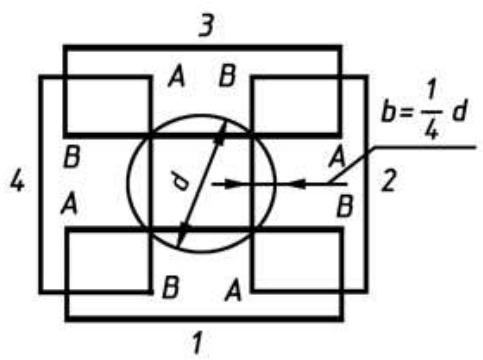


Рисунок 2 - Вимірювання відхилення від паралельності плоских вимірювальних поверхонь мікрометра

Відхилення від паралельності плоских вимірювальних поверхонь мікрометра для кожного розміру міри довжини кінцевої плоскопаралельної визначається як

найбільша різниця показів мікрометра при чотирьох положеннях міри довжини кінцевої плоскопаралельної.

Визначення відхилення показів мікрометра виконується у не менше як трьох точках рівномірно розташованих по шкалі мікрометра методом безпосереднього порівняння з мірами довжини кінцевими плоскопаралельними. При відліку показів по барабану мікрометра, шкала повинна знаходитися прямо перед очима, щоб уникнути помилки через паралакс. У тому випадку, коли є сумніви в відліку, застосовується лупа.

Відхилення показів мікрометра визначається наступним чином. Міра довжини кінцева плоскопаралельна (кінцева міра довжини) розташовується по центру вимірювальних поверхонь мікрометра, далі підводяться вимірювальні поверхні мікрометра до контакту при використанні пристрою, що забезпечує вимірювальне зусилля. Після чого проводиться відлік за шкалою мікрометра. Для оцінювання невизначеності вимірювання виконується не менше 10 повторних вимірювань для кожної точки калібрування. Визначення показів мікрометра виконується одним і тим же оператором в одних і тих же встановлених умовах калібрування.

Середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали мікрометра, визначається за формулою:

$$\bar{l}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n l_{i_0}}{n}, \quad (1)$$

де n – кількість вимірювань;

l_{i_0} – результат i -го вимірювання довжини, зчитаний зі шкали мікрометра, мм.

У кожній точці калібрування обчислюється відхилення показів мікрометра:

$$\Delta l_m = \bar{l}_0 - l_{МКП}, \quad (2)$$

де \bar{l}_0 – середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали мікрометра, мм;

$l_{МКП}$ – номінальне значення довжини, задане мірою довжини кінцевою плоскопаралельною, [мм].

Середнє квадратичне відхилення ряду результатів вимірювання обчислюється за формулою:

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{i_0} - \bar{l}_0)^2}{n-1}}, \quad (3)$$

де l_{i_0} – результат i -го вимірювання довжини, зчитаний зі шкали мікрометра, мм;

\bar{l}_0 – середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали мікрометра, мм.

Модельне рівняння (математичну модель) з урахуванням впливових факторів, що складають основні істотні джерела невизначеності вимірювання, можна визначити за наступним виразом:

$$\Delta l_m = \bar{l}_0 - l_{МКП} + \delta l_{пл.м} + \delta l_{пр.м} + \delta l_d + \delta l_{МКП} + \delta l_{ПМКП} + \delta l_{ДМКП}, \quad (4)$$

де \bar{l}_0 – середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали мікрометра, мм;

$l_{МКП}$ – номінальне значення довжини, задане мірою довжини кінцевою плоскопаралельною, мм;

$\delta l_{пл.м}$ – поправка на відхилення від площинності вимірювальних поверхонь мікрометра, мм;

$\delta l_{пр.м}$ – поправка на відхилення від паралельності вимірювальних поверхонь мікрометра, мм;

δl_d – поправка, що враховує роздільну здатність мікрометра, мм;

$\delta l_{МКП}$ – поправка на відхилення середнього значення довжини міри довжини кінцевої плоско паралельної, мм;

$\delta l_{ПМКП}$ – поправка на відхилення від плоскопаралельності міри довжини кінцевої плоскопаралельної, мм;

$\delta l_{ДМКП}$ – поправка на дрейф довжини міри кінцевої плоско паралельної, мм.

Сумарна стандартна невизначеність вимірювань, що враховує вплив вхідних величин, визначається за формулою:

$$u_c = \left(u_{\bar{l}_0}^2 + u_{l_{МКП}}^2 + u_{l_{пл.м}}^2 + u_{l_{пр.м}}^2 + u_d^2 + u_{ПМКП}^2 + u_{ДМКП}^2 \right)^{1/2}, \quad (5)$$

де $u_{\bar{l}_0}$ – стандартна невизначеність середнього результату вимірювання довжини з допомогою мікрометра, що калібрується, мм;

$u_{l_{МКП}}$ – стандартна невизначеність еталону міри довжини кінцевої плоскопаралельної, мм;

$u_{пл.м}$ – стандартна невизначеність, викликана відхиленням від площинності вимірювальних поверхонь мікрометра, мм;

$u_{пр.м}$ – стандартна невизначеність, викликана відхиленням від паралельності вимірювальних поверхонь мікрометра, мм;

u_d – стандартна невизначеність зчитування показів, викликана дискретністю мікрометра, мм;

$u_{ПМКП}$ – стандартна невизначеність, викликана відхиленням від плоскопаралельності міри довжини кінцевої плоскопаралельної, мм;

$u_{ДМКП}$ – стандартна невизначеність, викликана дрейфом довжини міри кінцевої плоскопаралельної, мм.

Стандартна невизначеність середнього результату вимірювання довжини з допомогою мікрометра, що калібрується, (за типом А), а також стандартні невизначеності інших складових бюджету невизначеностей (за типом В) оцінюються відповідно до алгоритмів, наведених у [11].

Калібрування індикаторів лінійних переміщень проводиться наступним чином. Індикатор встановлюють у рухомий кронштейн стійки, надійно закріплюючи його для забезпечення стабільності під час вимірювань. Потім кронштейн опускають до моменту, коли наконечник вимірювального стержня індикатора торкнеться поверхні вимірювального стола, а стрілка шкали зміститься на кілька поділок (щонайменше на п'ять). Після цього кронштейн фіксують у цьому положенні.

Для перевірки повторюваності показів стержень індикатора тричі піднімають і опускають, а потім нульовий штрих шкали суміщають із положенням стрілки. Далі наконечник індикатора піднімають і на вимірювальний стіл під ним встановлюють еталонну кінцеву міру довжини, після чого вимірювальний стержень обережно опускають на еталон. Важливо, щоб наконечник стержня торкався саме центру робочої поверхні кінцевої міри довжини для уникнення похибок.

Вимірювання проводять 10 разів для кожної кінцевої міри довжини. Визначають зміну показів індикатора при зусиллі 2,5 Н на вимірювальний стержень в напрямку, перпендикулярному до осі стержня. Для цього виконують наступні операції.

Переміщуючи кронштейн стійки ввверх чи вниз встановлюють вимірювальний стержень індикатора в положення, що відповідає середині діапазону вимірювання. Суміщають нульовий штрих шкали зі стрілкою, після чого спеціальним динамометричним пристосуванням, відградуїтованим на зусилля 2,5 Н ($\pm 0,1$ Н) натискають на вимірювальний наконечник індикатора послідовно з чотирьох сторін по двох взаємно перпендикулярних напрямках і спостерігають зміну показів індикатора. За результат приймають найбільше з отриманих значень.

Середнє значення результату вимірювання довжини індикатором визначається за формулою:

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i . \quad (6)$$

Середнє значення різниці показів індикатора та довжини міри довжини кінцевої плоскопаралельної за результатами n вимірювань визначається за формулою:

$$\overline{\Delta l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i - l_0 , \quad (7)$$

де l_i – i -те значення показів індикатора;

l_0 – номінальна довжина еталонної кінцевої міри;

n – число циклів вимірювання ($n = 10$).

Для побудови математичної моделі вимірювання ідентифікуємо джерела невизначеності вимірювання довжини за допомогою індикатора. З урахуванням цих джерел математична модель вимірювання набуде наступного вигляду:

$$\Delta l_I = \bar{l}_0 - l_{МКП} + \Delta l_{П} + \delta l_d + \delta l_{ДМКП}, \quad (8)$$

де \bar{l}_0 – середнє арифметичне значення довжини, зчитане зі шкали індикатора, мм;

$l_{МКП}$ – номінальне значення довжини, задане мірою довжини кінцевою плоскопаралельною, мм;

$\Delta l_{П}$ – поправка на зміну показів індикатора при зусиллі на вимірювальний стержень в напрямку, перпендикулярному до осі стержня, мм;

δl_d – поправка, викликана дискретністю відліку індикатора, мм;

$\delta l_{ДМКП}$ – поправка на дрейф довжини міри кінцевої плоскопаралельної, мм.

Оцінювання стандартних невизначеностей результату вимірювання довжини з допомогою індикатора, що калібрується, здійснюється за наступними алгоритмами.

Стандартна невизначеність вимірювання довжини (за типом А), зумовлена розкидом значень, визначається як середньоквадратичне відхилення різниці показів індикатора та значення довжини міри кінцевої плоскопаралельної за формулою:

$$u(l_0) = \frac{S(\Delta l_i)}{\sqrt{n}} , \quad (9)$$

де

Таблиця 1 – Бюджет невизначеності результатів вимірювання при калібруванні мікрометра

Вхідна величина $u_{(x_i)}$	Закон розподілу	Коефіцієнт чутливості C_i	Кількість ефективних степенів свободи	Стандартна невизначеність	Внесок невизначеності, $(c_i \cdot u_i)^2$, мм
					Ваговий внесок у невизначеність, %
$u_{\bar{l}_0}$	Нормальний	1	9	$u_{\bar{l}_0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{i_0} - \bar{l}_0)^2}{n(n-1)}}$	0,0002
					4,8805
$u_{nl.m}$	Прямокутний	1	∞	$u_{nl.m} = \frac{l_{nl.m}}{\sqrt{3}}$	0,0003
					7,3270
$u_{np.m}$	Прямокутний	1	∞	$u_{np.m} = \frac{l_{np.m}}{\sqrt{3}}$	0,0006
					14,6341
u_d	Прямокутний	1	∞	$u_d = \frac{d}{2\sqrt{3}}$	0,0029
					70,7317
$u_{l_{пмкп}}$	Прямокутний	1	∞	$u_{l_{пмкп}} = \frac{l_{пмкп}}{\sqrt{3}}$	0,00005
					1,2195
$u_{l_{мкп}}$	Нормальний	-	∞	$u_{l_{мкп}} = \frac{U_{l_{мкп}}}{2}$	0,000025
					0,6097
$u_{\Delta_{лмкп}}$	Прямокутний	1	∞	$u_{\Delta_{лмкп}} = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\sqrt{3}}$	0,00001
					0,2439
u_{sum}	Нормальний	-	-		0,0041
U	Нормальний	-	-	$U = k \cdot u_c$	0,0082

Таблиця 2 – Бюджет невизначеності результатів вимірювання при калібруванні індикаторів лінійних переміщень

Вхідна величина $u_{(x_i)}$	Закон розподілу	Коефіцієнт чутливості C_i	Кількість ефективних степенів свободи	Стандартна невизначеність	Внесок невизначеності, $(c_i \cdot u_i)^2$, мм
					Ваговий внесок у невизначеність, %
$u(\bar{\Delta}_l)$	Нормальний	1	9	$u_{\bar{l}_0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{i_0} - \bar{l}_0)^2}{n(n-1)}}$	0,0002
					5,4054
$\Delta l_{п}$	Прямокутний	1	∞	$\frac{MAX(\Delta l_i)}{2\sqrt{3}}$	0,0006
					16,2162
u_d	Прямокутний	1	∞	$u_d = \frac{d}{2\sqrt{3}}$	0,0029
					78,1783
$u_{\Delta_{лмкп}}$	Прямокутний	1	∞	$u_{\Delta_{лмкп}} = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\sqrt{3}}$	0,00001
					0,2702
u_{sum}	Нормальний	-	-		0,0037
U	Нормальний	-	-	$U = k \cdot u_c$	0,0074

$$S(\Delta_l) = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_{li} + \overline{\Delta_l})^2} . \quad (10)$$

Стандартна невизначеність, викликана зміною показів індикатора при зусиллі на вимірювальний стержень в напрямку, перпендикулярному до осі стержня визначається за формулою:

$$u(\Delta l_{II}) = \frac{MAX(\Delta l_{II})}{2\sqrt{3}}, \quad (11)$$

де $MAX(\Delta l_{II})$ - максимальне значення відхилення показів індикатора, мм.

Стандартна невизначеність, викликана дискретністю відліку індикатора визначається за формулою:

$$u(\delta l_d) = \frac{d}{2\sqrt{3}}, \quad (12)$$

де d - ціна поділки індикатора.

Стандартна невизначеність, викликана дрейфом довжини міри кінцевої плоскопаралельної оцінюється за типом B і обчислюється за формулою:

$$u_{ДМКП} = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\sqrt{3}}, \quad (13)$$

де Δ_1 - відхилення довжини від номінальної міри кінцевої плоскопаралельної, отримане за результатами останнього калібрування, мм;

Δ_2 - відхилення довжини від номінальної міри кінцевої плоскопаралельної, отримане за результатами передостаннього калібрування, мм.

Сумарна стандартна невизначеність результатів калібрування індикатора оцінюється виходячи з виразу для некорельованих вхідних величин та визначається за формулою:

$$u_c = \sqrt{u_{l_0}^2 + u_{ДМКП}^2 + u_{\Delta l_{II}}^2 + u_d^2 + u_{ДМКП}^2} . \quad (14)$$

Розширена невизначеність вимірювання (U , мм) обчислюється за формулою:

$$U = k \cdot u_c, \quad (15)$$

де k - коефіцієнт охоплення ($k=2$ при рівні довіри 95%).

За результатами калібрувань засобів вимірювальної техніки геометричних величин, зокрема, мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень визначено їх метрологічні характеристики, сформовано складові бюджету та їх внесок у невизначеність вимірювань (таблиці 1 і 2, відповідно).

Висновки

Відповідно до вимог міжнародних документів, що регламентують акредитацію і діяльність калібрувальних лабораторій вказані лабораторії можуть розробляти нестандартизовані методики калібрування, що є невід'ємною частиною забезпечення єдності вимірювання та метрологічної простежуваності результатів калібрування.

Розроблені методичні матеріали надають практичні рекомендації калібрувальним лабораторіям щодо розроблення методик калібрування засобів вимірювальної техніки геометричних величин, зокрема мікрометрів та індикаторів лінійних переміщень.

Основою для розроблення методик калібрування є складання модельного рівняння (математичної моделі), формування бюджету і оцінювання невизначеності результатів вимірювання.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» №1314-VII від 05.06.2014р.
2. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2109 Національний стандарт України. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2107, IDT)
3. ISO/IEC GUIDE 99:2007 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) (Міжнародний словник з метрології - Основні і загальні поняття і відповідні терміни (VIM)).

4. EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. (Вираження невизначеності вимірювання при калібруванні).

5. ILAC G8:09/2019 Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity (Керівництво з правил ухвалення рішення та декларацій відповідності)

6. ILAC-P10:07/2020 ILAC Policy on Metrological Traceability of Measurement Results. (Політика ILAC щодо метрологічної простежуваності результатів вимірювання)

7. ILAC P14:09/2020 ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration (Політика ILAC щодо невизначеності вимірювань в калібруванні)

8. ЗД-08.00.09 Політика НААУ щодо метрологічної простежуваності вимірювання, що проводять органи з оцінки відповідності відповідно до заявленої сфери акредитації

9. ЗД-08.00.29 Політика НААУ щодо участі органів з оцінки відповідності у перевірках професійного рівня та міжлабораторних порівняннях, відмінних від перевірок професійного рівня

10. ІН-08.02.05 Інструкція «Формування сфери акредитації калібрувальної лабораторії»

11. Кепешчук Т.В., Пастущин Л.Б., Пташенчук В.В. Типова методика калібрування штангенінструменту. *Перспективні технології та прилади*. 2023. №23. С. 30-37.

References

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» №1314-VII від 05.06.2014р. [in Ukrainian]

2. DSTU EN ISO/IEC 17025:2109 Natsionalnyi standart Ukrainy. Zahalni vymohy do kompetentnosti vyprobuvalnykh ta kalibruvalnykh laboratorii. (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2107, IDT). [in Ukrainian]

3. ISO/IES GUIDE 99:2007 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)

(Mizhnarodnyi slovnyk z metrolohii - Osnovni i zahalni poniattia i vidpovidni termini (VIM)).

4. EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. (Vyrazhennia nevyznachenosti vymiriuvannia pry kalibruvanni).

5. ILAC G8:09/2019 Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity (Kerivnytstvo z pravyl ukhvalennia rishennia ta deklaratsii vidpovidnosti)

6. ILAC-P10:07/2020 ILAC Policy on Metrological Traceability of Measurement Results. (Polityka ILAC shchodo metrolohichnoi prostezhuvanosti rezultativ vymiriuvannia)

7. ILAC P14:09/2020 ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration (Polityka ILAC shchodo nevyznachenosti vymiriuvan v kalibruvanni)

8. ZD-08.00.09 Polityka NAAU shchodo metrolohichnoi prostezhuvanosti vymiriuvannia, shcho provodiat orhany z otsinky vidpovidnosti vidpovidno do zaiavlenoi sfery akredytatsii. [in Ukrainian]

9. ZD-08.00.29 Polityka NAAU shchodo uchasti orhaniv z otsinky vidpovidnosti u perevirkakh profesiinoho rivnia ta mizhlaboratornykh porivnianniakh, vidminnykh vid perevirok profesiinoho rivnia [in Ukrainian]

10. ІН-08.02.05 Інструкція «Formuvannia sfery akredytatsii kalibruvalnoi laboratorii». [in Ukrainian]

11. Kepeshchuk T.V., Pastushchyn L.B., Ptashenchuk V.V. Typova metodyka kalibruvannia shtanheninstrumentu. *Perspektyvni tekhnologii ta prylady*. 2023. №23. S. 30-37. [in Ukrainian]

METHODOLOGICAL ASPECTS OF TOOL CALIBRATION MEASURING TECHNIQUES OF GEOMETRIC QUANTITIES

T. V. Kepeshchuk, L. B. Pastushchyn

State Enterprise "Ivano-Frankivsk Scientific and Production Center for Standardization, Metrology and Certification"; 127 Vovchynetska St., Ivano-Frankivsk, 61002, Ukraine; e-mail: ktv.metr77@gmail.com

УДК 006.91, 681.2-5

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-15-25

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ТА СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ

А. О. Колесниченко, С. Ю. Плєснецов, Ю. О. Плєснецов

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: serhii.pliesnetsov@khpri.edu.ua*

Задачі автоматичного калібрування та налаштування систем є поширеними та виникають у багатьох сферах, у тому числі метрологічного спрямування. У роботі наведено загальний аналіз елементів системи стандартизації України, спрямованих на регулювання задач калібрування метрологічного обладнання. Виконано аналіз українських та зарубіжних інформаційних джерел щодо калібрування метрологічного обладнання, а також калібрування інших систем, підходи до яких можуть бути застосовані у вирішенні задач автоматизації калібрування метрологічного (вимірювального, контрольно-діагностичного) обладнання. Визначено, що в Українських джерелах задача автоматизації процесу або процедури калібрування зустрічається мінімально, і в основному у контексті зарубіжних досліджень, в той час як українські дослідники здебільшого зосереджені на окремих споріднених задачах, таких як віддалена телеметрія та керування метрологічним обладнанням. Розглянуто зарубіжні джерела щодо задач автоматичного, автоматизованого калібрування приладів, систем тощо. Відзначено дві основні дихотомії напрямків роботи зарубіжних дослідників у контексті задач калібрування, а саме: нейромережеве – алгоритмічне (недетерміністичне – детерміністичне), абстраговане до узагальнених систем – спеціалізоване до безпосередньої реалізації. Оскільки задача калібрування є широкою, розглянуті джерела охоплюють більш ніж виключно безпосереднє метрологічне застосування задач калібрування. Розглянуті джерела також включають задачі калібрування програмних та електронних систем неметрологічного призначення. Виявлені методи та рішення для систем калібрування, автоматизації калібрування, реалізовані у формі алгоритмів, приладів, нейромереж, застосовані до приладів, сенсорів, програмних середовищ тощо.

Ключові слова: метрологія; вимірювання; стандартизація; огляд; нейромережі; алгоритмізація; програмне забезпечення; приладобудування; калібрування; автоматизація.

The tasks of automatic calibration and adjustment of systems are common and arise in many areas, including the metrology direction. The work provides a general analysis of the elements of Ukraine's standardization system aimed at regulating the calibration tasks of metrological equipment. The analysis of Ukrainian and foreign information sources on the calibration of metrological equipment, as well as the calibration of other systems, approaches to which can be applied in solving the problem of automating the calibration of metrological (measuring, control and diagnostic) equipment was performed. It was determined that in Ukrainian sources, the task of automating the calibration process or procedure occurs minimally, and mainly in the context of foreign research, while Ukrainian researchers are mostly focused on certain related tasks, such as remote telemetry and control of metrological equipment. Considered foreign sources regarding the task of automatic, automated calibration of devices, systems, etc. Two main dichotomies of the work directions of foreign researchers in the context of the calibration task are noted, namely: neural network - algorithmic (non-deterministic - deterministic), abstracted to generalized systems - specialized to direct implementation. Because the calibration task is broad, the sources reviewed cover more than just the direct metrological application of the calibration task. The considered sources also include problems of calibration of software and electronic systems of non-metrological purpose. The identified methods and solutions for calibrating systems, calibration automation, implemented in the form of algorithms, devices, neural networks, applied to devices, sensors, software environments, etc.

Keywords: metrology; measurement; standardization; review; neural networks; algorithmization; software; instrument building; calibration; automation.

Вступ

Завдання автоматичного калібрування та налаштування систем часто зустрічаються й актуальні в різних галузях. Так, зазвичай процес калібрування вимірювального або контрольно-діагностичного приладу є процедурою, що вимагає

відносно багато діяльності, пов'язаної з витратами часу роботи спеціаліста, яка є стандартизованою та механічною. Операція калібрування регламентувалась ДСТУ 3989 «Калібрування засобів вимірювальної техніки» [1], який було виведено з обігу у 2017 році разом із рядом

інших стандартів метрології. На даний момент регламентування виконується за відповідним законом України [2].

Калібрування – це комплекс операцій, які виконуються під час регулювання та періодичного підтвердження градуовальних характеристик вимірювальних чи контрольно-діагностичних приладів та систем, або інших систем чи засобів, що покладаються на аналогічні засади, з метою встановлення кореляції між показаннями та кінцевим результатом [2].

Автоматизація задачі калібрування дозволяє як прискорити процес, так і мінімізувати участь у ньому «людського фактору».

Для вирішення застосовують як програмно-алгоритмічні методи [3], так і неймережеві [4]. Поширеною сферою застосування автоматизованого калібрування та налаштування є задачі комп'ютерного зору [5, 6], але також подібні задачі є актуальними для задач калібрування вимірювальних систем [7, 8].

Мета роботи – виконати огляд існуючих досліджень, спрямованих на автоматизацію задачі калібрування вимірювального або контрольно-діагностичного обладнання та визначити актуальні напрямки подальшого розвитку питання.

Загальна характеристика процесу калібрування і інтеграції автоматизації

Принцип автоматичного калібрування зводиться до вирішення задачі пошуку номінальних параметрів роботи системи, тобто до зіставлення поточного значення з еталонним для наявного зразка.

В роботі [9] вказано, що «до недоліків традиційних систем відносять:

- надлишкові витрати часу при транспортуванні засобу вимірювальної техніки до калібрувальної лабораторії;

- зупинка технологічного або іншого виробничого процесу на певний термін під час проведення калібрування засобів вимірювальної техніки (якщо це обладнання використовується в цьому процесі);

- витрата коштів на транспортування;
- надлишкові витрати на оплату праці кваліфікованого персоналу калібрувальної лабораторії під час відвідування лабораторії підприємства;
- надлишкова присутність людського фактору під час проведення процедури, яка має бути виключно об'єктивною та неупередженою».

Процедура калібрування, наприклад, для приладів ультразвукового неруйнівного контролю буде зводитись до наступної послідовності операцій:

- 1) встановлення датчика на калібрувальний зразок;

- 2) визначення положення донного імпульсу;

- 3) виставлення часової розгортки відповідно до позиції донного імпульсу;

- 4) коректування кривої вирівнювання до номінального значення.

Відповідно, автоматизації підлягають ті операції, які мають в собі складову ручного корегування вхідних даних. У вищенаведеному прикладі, керування підлягають операції (2) та (3).

Положення донного імпульсу може бути визначено як положення першого піку після зондуючого імпульсу, причому часове положення донного імпульсу є заздалегідь відомим для стандартного калібрувального зразка.

Окремим питанням постає визначення точності та/або невизначеності для (наприклад) часового положення імпульсу при калібруванні, бо невизначеності додаються калібрувальним обладнанням, контрольним обладнанням тощо.

Існуючі стандарти, що регламентують операції калібрування

З урахуванням того, що стандарт [1] є неіючі, окремі метрологічні операції у кожному випадку регламентуються (за наявності) окремими стандартами. Також існує ряд споріднених стандартів, які регламентують операції вимірювання та вимоги до вимірювального обладнання, процедури тощо.

Стандарт [10] «містить як вимоги, так і настанови щодо запровадження систем

керування вимірюванням і може бути корисним у поліпшенні вимірювальних дій і якості продукції».

Стандарт [11] наводить «інформацію про офіційні заходи, які можуть бути здійснені державою для надання статусу «узаконений» засобам вимірювальної техніки». В ньому «розглянуто всі можливі методи, які треба застосовувати як ефективний метод під час таких офіційних заходів». Такий переклад відображає певну недбалість, яка мала місце при його складанні.

Іншим чинним документом, який є спорідненим до задачі калібрування, є [12], який в першу чергу той, що насамперед регламентує типи обладнання та умови, за яких це обладнання підлягає процедурі повірки.

Прикладом вузькоспеціалізованого стандарт [13] регламентує безпосередньо вимоги до процедури калібрування просторових вимірювальних систем ультразвукових сканерів.

Дослідження та публікації щодо автоматизації калібрування в Україні

У роботі [14] запропоновано підхід та обґрунтовано доцільність тренування нейронної мережі на базі алгоритмів глибинного навчання з метою автоматизації задач калібрування вимірювального обладнання.

Задачі віддаленого калібрування розглядалися українськими науковцями вже давно. Так, у роботі [15] розглянуто можливості проведення операцій калібрування з використанням засобів інтернет-телеметрії, що можливо для обладнання, виготовленого згідно певних вимог. Пізніше автори пропонують методологію дистанційного калібрування систем для аналізу якості постачання електричної енергії на стороні споживача [16].

У роботі [17] автори зосереджуються на процедурних особливостях калібрування обладнання в межах офіційних операцій налаштування вимірювального обладнання в Україні, і приходять до висновків, що «нагальною

потребою є розробка на національному рівні документів, що роз'яснюють та уніфікують процедури калібрування та оформлення їх результатів», а також що «Необхідно запровадити систему навчання та сертифікації персоналу з метрології, особливо для органів з оцінювання відповідності, які надають послуги з калібрування, і органів, які оцінюють компетентність виконавців таких послуг», не зосереджуючись при цьому на технічних аспектах процедури і напрямках її розвитку.

Робота [18] спрямовує увагу на значущість забезпечення єдності вимірювань у державній метрологічній системі та показує, що «для досягнення єдності вимірювань у сфері метрологічного підтвердження ЗВТ необхідно домогтися єдності міжнародних нормативних документів щодо процедур проведення верифікації та калібрування ЗВТ, а також методик оцінювання точності й достовірності отриманих результатів верифікації та калібрування ЗВТ». Як і попередня робота, даний матеріал не є спрямованим на створення інноваційних технологічних підходів до впровадження засобів автоматизації у задачі калібрування.

Загалом, в Україні напрямок автоматизації калібрування досліджується дуже обмежено, і наявні дослідження здебільшого спрямовані на дистанційне вирішення задачі калібрування, а також на засвоєння у цьому аспекті нейромереж.

Дослідження та публікації щодо автоматизації калібрування в світі

Закордонні роботи, присвячені питанням автоматичного калібрування, спрямовані на ряд ключових напрямків. *По-перше*, це задачі калібрування абстрагованих систем, приведених до приватних випадків, які, наприклад [19] розглядають калібрування нейромережевої системи для визначення параметрів навантаження аркових конструкцій методом кінцевих елементів (МКЕ). Автори відмічають, що «введення чотирьох незалежних параметрів МКЕ

замість трьох у двоетапне калібрування покращило відповідність між результатами моделювання та експерименту» в одних випадках, однак погіршило відповідність у інших, а також збільшило варіативність параметрів. Автори додають, що окремі методи не обов'язково гірші один за інший, оскільки довільно вибрані функції алгоритмів можуть бути додатково оптимізовані». «Однак така поведінка, пишуть автори, - чітко показує, що введення нового незалежного параметра не завжди є вигідним».

Схожі задачі вирішуються у роботах, [20], де наводяться підходи до алгоритмізації задачі автоматичного калібрування абстрагованої системи.

На рис. 1 наведено ілюстрацію зміни результатів виконання моделі з роботи [20] до та після виконання калібрування.

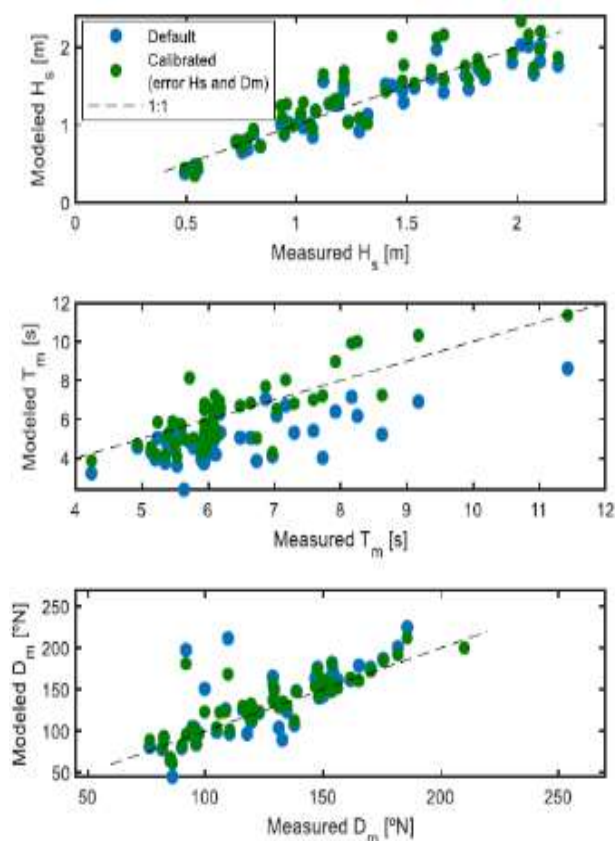


Рисунок 1 – Порівняння моделі призводить до конфігурації за замовчуванням і калібрування за допомогою цільової функції на основі похибок H_s і D_m [20]

Авторами роботи [21] запропоновано методологію калібрування алгоритму JOREK («Нелінійний розширений код магнітогідродинаміки JOREK вирішує реалістичну геометрію тороїдальних токамаків X-точок за допомогою безперервної сітки G1, вирівняної за поверхнею потоку, включаючи основну плазму, шар зішкрябаня та ділянку відводу» [22]). Як відмічають автори, «вирівнювання моделей п'єдесталів і відповідних магнітогідродинамічних кодів з експериментальними даними є важливою проблемою для того, щоб мати можливість генерувати прогнози для майбутніх пристроїв, наприклад, ITER. Попередні спроби виконати калібрування невідомих параметрів моделі здебільшого були ручним процесом». У статті описується створення структури для автоматичного калібрування JOREK та переформулюється проблема калібрування в задачу оптимізації чорної скриньки, визначивши міру розбіжності між експериментом і еталонною величиною.

Авторами роботи [23] було виконано дослідження задачі калібрування при виконанні аналізу спектрограм. Задача калібрування в цій сфері, як відмічають автори, завжди залишалась важкою для автоматизації. Автори відмічають: «новий алгоритм автоматичного калібрування довжини хвилі для пасивної диференційної оптико-абсорбційної спектроскопії на основі технології узгодження послідовностей для оцінки спектральних параметрів каналів спектрометра, інтегруючи вдосконалені засоби обробки, такі як покращення структури ознак та субпіксельна інтерполяція. Ці заходи значно зменшують залежність від еталонної роздільної здатності спектру та точно коригують навіть незначні спектральні зсуви. Ми проводимо експерименти з чутливістю, використовуючи синтетичні спектри, щоб визначити оптимальні конфігурації пошуку».

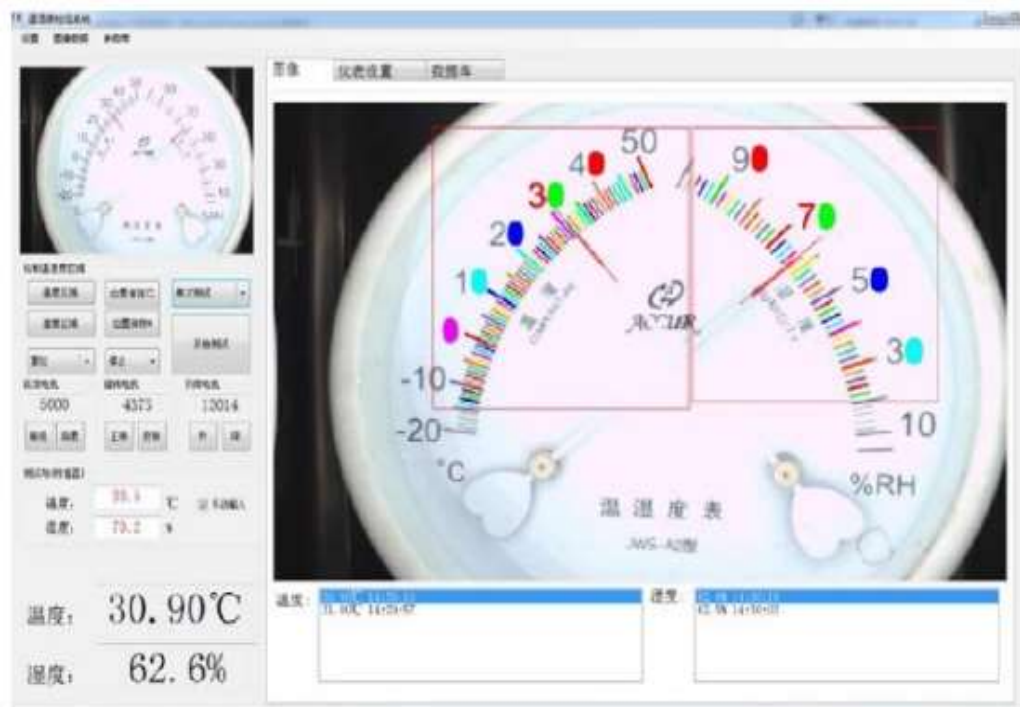


Рисунок 2 – Аналіз показів стрілкового термогігрометра на основі комп'ютерного зору [25, рис. 5]

Другою категорією робіт, присвячених вирішенню задачі автоматичного калібрування, є роботи, автори яких вирішують задачу автоматизації калібрування окремої характеристики приладу чи системи. Так, у роботі [24] авторами розглянуто метод автоматичного калібрування для аберації поля зору в датчику зображення на основі призми Райслі. Як вказують автори у роботі, «Датчики зображення на основі призми Райслі можуть розширити поле зору зображення за допомогою керування променем. Чим більше верхній кут призми, тим вище збільшення поля зору, але в той же час це посилює проблему аберацій зображення, що також висуває вищі вимоги до методу корекції аберацій для призми Райслі». Для покращення характеристик процесу авторами «пропонується автоматичний метод калібрування датчика зображення на основі призми Райслі на основі двовісного поворотного столу. Набори даних зображення калібрувальної пластини з різними кутами повороту призми та відстанями до об'єктів отримані за допомогою двоосьового поворотного

столу. Потім зображення калібрувальної пластини попередньо обробляються за допомогою алгоритму бікубічної інтерполяції. Параметри калібрування остаточно розраховуються, і виконується оптимізація параметрів». Автори вказують, що отримані експериментальні результати підтверджують здійсненність наведеного автоматичного методу калібрування.

Автори роботи [25] спрямували зусилля на автоматизацію калібрування системи термогігromетрів. Автори відмічають у роботі, що створена ними «система, заснована на технології візуального розпізнавання в поєднанні з інтелектуальною автоматизацією, реалізує автоматизацію калібрування термогігromетрів. Нововведення розв'язувати практичні проблеми, викликані традиційним методом», який, як вказано вище та відзначено у статті, є часомістким та включає істотний вплив людського фактору.

Автори відмічають, що створена ними система автоматичного калібрування на основі комп'ютерного зору (рис. 2) «економить робочу силу, зменшує трудовитрати та забезпечує точність

результатів, підвищення ефективності роботи та перевищення очікуваних результатів».

У роботі [26] авторами показано результати роботи над системою імерсивного нанесення покриттів з контрольним модулем, який містить систему автоматичного калібрування.

Як відмічають автори, «проект представляє інструмент для нанесення покриття зануренням із цифровим керуванням часом занурення та швидкістю за допомогою мікроконтролера з автоматичною системою калібрування. Використовуючи підхід до крокового двигуна та математичної формули, інструмент досягає високої точності шляхом автоматичного налаштування параметрів занурення з ключовими показниками, та мінімізує помилки до 0-2% на 20-650 кроках». Відносно підходу до системи калібрування автори вказують наступне: «Метод калібрування для цього інструменту полягає у використанні системи калібрування за точкою, яка фіксує дані калібрування на основі кількох точок швидкості, щоб підвищити точність і точність інструменту та мінімізувати помилки, щоб бути більш точним. Буде шукано кілька відкаліброваних точок швидкості, наближених до швидкості, з якою буде працювати система, які будуть порівнюватись із робочою швидкістю. Після цього ходова швидкість буде скоригована до точки помилки швидкості, отриманої під час калібрування».

У роботі [27] автори зосередили увагу на розробці системи для автоматизації калібрування модулів інерційних вимірювань. Інерційні сенсори використовуються для аналізу кінематичного стану систем при визначенні швидкості, позиціонування, прискорення тощо. Як відмічають автори, «щоб задовольнити потреби автоматичного калібрування та калібрування партії MEMS IMU (модулі інерційних вимірювань мікроелектромеханічних систем) в той же час, пропонується автоматична система калібрування для MEMS IMU. Базуючись

на високоточних тривісних поворотних платформах, схема зв'язку «передній і головний контроль» була застосована для керування кількома вертушками з партією IMU на кожній, щоб можна було здійснити пакетне калібрування малих інерційні компонентів в повністю автоматичному режимі».

Робота [28] спрямована на задачу автоматизації калібрування дисплеїв для систем доповненої реальності. Автори відмічають, що зазвичай для вирішення цієї задачі використовують детерміністичні методи оптимізації. В той же час, вони відмічають набуття популярності і збільшення кількості досліджень, що показують успішне вирішення задач такого типу з використанням недетерміністичних методів. У роботі автори скористались оптимізаційними алгоритмами відпалу, еволюційної стратегії та рою часток у застосуванні до віртуального об'єкту у середовищі доповненої реальності. Творами відзначено успішне застосування кожного з наведених алгоритмів у вирішенні задачі калібрування досліджуваної системи (рис. 3).

Автор роботи [29] виконав аналіз ефекту автоматичного контролю рівня потужності генератора сигналів у калібруванні датчика радіочастотної потужності за допомогою методу прямого порівняння та застосування міліметрових хвиль. Як показує автор, «хоча попередні дослідження рекомендували APLC (автоматичний контроль рівня потужності) для DCTM (метод прямого порівняння), який використовується для надійного та точного калібрування датчиків потужності в багатьох експериментах, це дослідження показало, що калібрування коаксіальних датчиків потужності можна виконувати без APLC на різних рівнях потужності. Для рівнів потужності 0 дБм і -30 дБм було виконано (експериментальне) калібрування коаксіального датчика потужності DCTM з APLC і DCTM без APLC.

Результати вимірювань показали, що розраховані фактори калібрування датчика потужності дослідженого приладу з APLC

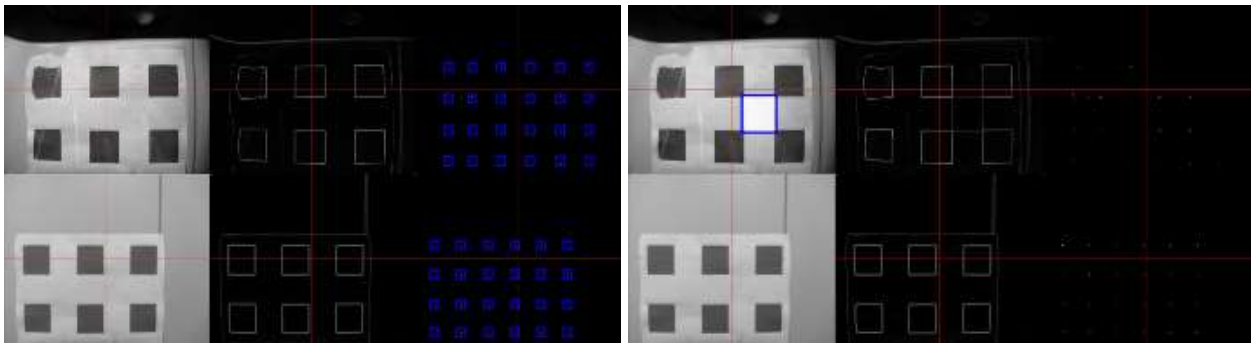


Рисунок 3 – Процес калібрування системи доповненої реальності на базі недетерміністичних методів [28, рис. 7]

і без APLC слідує один за одним з різницею в %0,1. Ці відмінності походять від стандартного відхилення вимірювань».

Висновки

1. Виконаний огляд показав, що сучасні українські дослідження мало зосереджені на вирішенні задачі калібрування обладнання, і значною мірою спрямовані на дослідження споріднених задач, таких як телеметрія та віддалений контроль вимірювального обладнання.

2. Визначено два основних напрямки досліджень задачі автоматичного калібрування – вирішення абстрагованих, математичних, програмних задач через створення системи автоматизованого калібрування та прикладна аплікація системи автоматизованого чи частково автоматизованого калібрування до наявного обладнання, або обладнання, що знаходиться у розробці.

3. Визначено, що науковці активно вивчають задачі автоматизації калібрування як детерміністичними, традиційно-алгоритмічними методами, так і з широким залученням недетерміністичних підходів, в першу чергу на базі нейромереж.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 3989-2000. Метрологія. Калібрування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення та оформлення результатів (61379)

2. Про метрологію та метрологічну діяльність. Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII.

3. Wei Pengjin, Yan Guohang, Li Yikang, Fang Kun, Cai Xinyu, Liu Wei, Yang Jie. Automatic multi-LiDAR calibration and refinement method. *Measurement Science and Technology*. 2024. 35. DOI: [10.1088/1361-6501/ad3c60](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad3c60)

4. Chairat Sawrawit, Chaichulee Sittichok Dissaneewate, Tulaya Wangkulangkul, Piyanun, Kongpanichakul, Laliphat. AI-Assisted Assessment of Wound Tissue with Automatic Color and Measurement Calibration on Images Taken with a Smartphone. *Healthcare*. 2023. Vol. 11(2). P. 273. DOI: [10.3390/healthcare11020273](https://doi.org/10.3390/healthcare11020273)

5. Covolan João Pedro Oliveira, Claiton Sanches, S.R.R., Sementille Antonio. Non-deterministic method for semi-automatic calibration of smartphone-based OST HMDs. *Virtual Reality*. 2024. 28. DOI: [10.1007/s10055-024-00978-1](https://doi.org/10.1007/s10055-024-00978-1).

6. Zheng Jiangyi, Xie Pinhua, Tian Xin, Xu Jin, Qin Min, Hu Feng, Lv Yinsheng, Zhang Zhidong, Zhang Qiang, Liu Wenqing. Research on Automatic Wavelength Calibration of Passive DOAS Observations Based on Sequence Matching Method. *Remote Sensing*. 2024. 16. 1485. DOI: [10.3390/rs16091485](https://doi.org/10.3390/rs16091485)

7. Hu Xiaoyin, Li Ye, Zhang Haoyu, Yu Yueling, Kang Zhangyi Design and Application of Automatic Calibration Device for Multi-Channel Resistance Strain Gauge Indicator. *Journal of Physics: Conference*

Series. 2021. 2113. 012040. DOI: [10.1088/1742-6596/2113/1/012040](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2113/1/012040)

8. Jeong Doo, Kim Jong Dae Song, Hye Kim, Yu-Seop Park Chan. Efficient Calibration Tool for Thermistor Temperature Measurements. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. 764-765. 1304-1308. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.764-765.1304](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.764-765.1304)

9. Шведова В.В., Шейнич С.І. Огляд і аналіз існуючих технічних рішень побудови систем калібрування. [електронний ресурс]. URL: <https://naukam.triada.in.ua/index.php/konfeentsiji/66-tridtsyat-p-yata-vseukrajinska-praktichno-piznavalna-internet-konferentsiya/860-oglyad-i-analiz-isnyuyuchikh-tekhnichnikh-rishen-pobudovi-sistem-kalibruvannya>

10. ДСТУ ISO 10012:2005 Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012:2003, IDT)

11. ДСТУ OIML D 3:2008 Метрологія. Відповідність засобів вимірювальної техніки законодавчим вимогам (OIML D 3:1979, IDT)

12. Порядок проведення перевірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів. Наказ Міністерства економічного розвитку і торгівлі України №193 від 08.02.2016, Київ, Україна, 2016.

13. ДСТУ EN 61391-1:2018 Ультразвук. Ехо-імпульсні сканери. Частина 1. Методи калібрування просторових вимірювальних систем та вимірювання розсіювання точки функційного відгуку (EN 61391-1:2006, IDT; ІЕС 61391-1:2006, IDT). Зі зміною № 1:2018.

14. Довгополий С.О. Калібрування засобів вимірювальної техніки за допомогою штучних нейронних мереж. Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті. Т. 4: Конференція "Перспективи розвитку інфокомунікацій та інформаційно-вимірювальних технологій": матеріали 28-го Міжнар. молодіж. Форуму. 16–18 квіт. 2024. С. 198 – 200.

15. Величко О.М. Калібровка засобів вимірювальної техніки через інтернет: стан і перспективи впровадження *Український метрологічний журнал*. 2006. №1. С. 45-49.

16. Величко О.Н., Карпенко С.Р., Гурин Р.В. Дистанційне калібрування аналізаторів якості електричної енергії фірми FLUKE *Збірник наукових праць ОДАТРЯ*. 2013. № 1(2).

17. Єременко В.С., Мокійчук В.М., Рамазанова-Стьопкіна О.А., Редько О.О. Національні особливості калібрування. *Український метрологічний журнал*. 2017. №4. С. 12-18.

18. Мотало В.П. Аналіз методик верифікації та калібрування засобів вимірювальної техніки. *Вимірювальна техніка і метрологія*. 2019. Вип. 80, №1. С. 51-66.

19. Kibriya Ghulam, Botzheim János, Orosz Ákos, Bagi Katalin. Automatic calibration of a discrete element model of a masonry arch by swarm intelligence methods. *Computers. Structures*. 2024. 299. 107401. DOI: [10.1016/j.compstruc.2024.107401](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107401)

20. Yilmaz Muhammet. An Automatic Parameter Calibration Method for the TUV Model in Streamflow Modeling. *Journal of the Institute of Science and Technology*. 2024. Vol. 14. P. 773-782. DOI: [10.21597/jist.1406563](https://doi.org/10.21597/jist.1406563)

21. Crovini E., Pamela S. J. P., Duncan A. B., JOREK Team. Automatic JOREK calibration via batch Bayesian optimization. *Phys. Plasmas*. 1 June 2024; 31 (6): 063901. DOI: [10.63/5.0191997](https://doi.org/10.63/5.0191997)

22. The JOREK non-linear MHD Code [електронний ресурс]. URL: <https://www.jorek.eu/>

23. Zheng Jianguyi, Xie Pinhua, Tian Xin, Xu Jin, Qin Min, Hu Feng, Lv Yinsheng, Zhang Zhidong, Zhang Qiang, Liu Wenqing. Research on Automatic Wavelength Calibration of Passive DOAS Observations Based on Sequence Matching Method. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. P. 1485. DOI: [10.3390/rs16091485](https://doi.org/10.3390/rs16091485)

24. Lin Zhonglin, Liu Wenchao, Gan Jinyu, Lu Jilian, Huang Feng, Wu Xianyu, Wang Weixiong. An Automatic Calibration

Method for the Field of View Aberration in a Risley-Prism-Based Image Sensor. *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 7777. DOI: [10.3390/s23187777](https://doi.org/10.3390/s23187777)

25. Yang Ju, Yi Hong, Li Zhangyuan Ren Changqing. Automatic calibration system of thermo-hygrometers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. 2554. 012002. DOI: [10.1088/1742-6596/2554/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2554/1/012002)

26. Rahman Nizar, Sya'roni Imam, Hartanto Anton, Prasetyono Agus, Subiantoro Irfan. Design and build a microcontroller based dip coater tool with an automatic calibration system. *Indonesian Physical Review*. 2024. Vol. 8. P. 48-61. DOI: [10.29303/ipr.v8i1.364](https://doi.org/10.29303/ipr.v8i1.364)

27. Zhu Lihua, Yun Qifan, Wu Zhiqiang, Chen Cheire. Design of Automatic Batch Calibration and Correction System for IMU. *Computers, Materials, Continua*. 2021. Vol. 71. P. 1489-1501. DOI: [10.32604/cmc.2022.0220](https://doi.org/10.32604/cmc.2022.0220)

28. Covolan J.P.M., Oliveira C., Sanches S.R.R. et al. Non-deterministic method for semi-automatic calibration of smartphone-based OST HMDs. *Virtual Reality*. 2024. Vol. 28, P. 77. DOI: [10.1007/s10055-024-00978-1](https://doi.org/10.1007/s10055-024-00978-1)

29. Danacı Erkan. Analyzing the Automatic Power Level Control Effect of a Signal Generator in RF Power Sensor Calibration by a Direct Comparison Transfer Method and a Millimeter Wave Application. *Sensors*. 2024. 24. DOI: [10.3390/s24020609](https://doi.org/10.3390/s24020609)

References

1. DSTU 3989-2000. Metrolohiia. Kalibruvannia zasobiv vymiriuvanoi tekhniki. Osnovni polozhennia, orhanizatsiia, poriadok provedennia ta oformlennia rezultativ (61379). [in Ukrainian]

2. Pro metrolohiuu ta metrolohichnu diialnist. Zakon Ukrainy vid 05.06.2014 № 1314-VII. [in Ukrainian]

3. Wei Pengjin, Yan Guohang, Li Yikang, Fang Kun, Cai Xinyu, Liu Wei, Yang Jie. Automatic multi-LiDAR calibration and refinement method. *Measurement Science and*

Technology. 2024. 35. DOI: [10.1088/1361-6501/ad3c60](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad3c60)

4. Chairat Sawrawit, Chaichulee Sittichok Dissaneewate, Tulaya Wangkulangkul, Piyanun, Kongpanichakul, Laliphat. AI-Assisted Assessment of Wound Tissue with Automatic Color and Measurement Calibration on Images Taken with a Smartphone. *Healthcare*. 2023. Vol. 11(2). P. 273. DOI: [10.3390/healthcare11020273](https://doi.org/10.3390/healthcare11020273)

5. Covolan João Pedro Oliveira, Claiton Sanches, S.R.R., Sementille Antonio. Non-deterministic method for semi-automatic calibration of smartphone-based OST HMDs. *Virtual Reality*. 2024. 28. DOI: [10.1007/s10055-024-00978-1](https://doi.org/10.1007/s10055-024-00978-1).

6. Zheng Jiangyi, Xie Pinhua, Tian Xin, Xu Jin, Qin Min, Hu Feng, Lv Yinsheng, Zhang Zhidong, Zhang Qiang, Liu Wenqing. Research on Automatic Wavelength Calibration of Passive DOAS Observations Based on Sequence Matching Method. *Remote Sensing*. 2024. 16. 1485. DOI: [10.3390/rs16091485](https://doi.org/10.3390/rs16091485)

7. Hu Xiaoyin, Li Ye, Zhang Haoyu, Yu Yueling, Kang Zhangyi Design and Application of Automatic Calibration Device for Multi-Channel Resistance Strain Gauge Indicator. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 2113. 012040. DOI: [10.1088/1742-6596/2113/1/012040](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2113/1/012040)

8. Jeong Doo, Kim Jong Dae Song, Hye Kim, Yu-Seop Park Chan. Efficient Calibration Tool for Thermistor Temperature Measurements. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. 764-765. 1304-1308. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.764-765.1304](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.764-765.1304)

9. Shvedova V.V., Sheinykh S.I. Ohliad i analiz isnuuychikh tekhnichnykh rishen pobudovy system kalibruvannia. Naukove myslennia [elektronne dzherelo]. URL: <https://naukam.triada.in.ua/index.php/konfeentsiji/66-tridtsyat-p-yata-vseukrajinska-praktichno-piznavalna-internet-konferentsiya/860-oglyad-i-analiz-isnuuychikh-tekhnikh-rishen-pobudovi-sistem-kalibruvannya> [in Ukrainian]

10. DSTU ISO 10012:2005 Systemy keruvannia vymiriuvanniam. Vymohy do protsesiv vymiriuvannia ta vymiriuvannoho obladdannia (ISO 10012:2003, IDT) [in Ukrainian]
11. DSTU OIML D 3:2008 Metrolohii. Vidpovidnist zasobiv vymiriuvanoi tekhniky zakonodavchym vymoham (OIML D 3:1979, IDT) [in Ukrainian]
12. Poriadok provedennia povirky zakonodavcho rehulovanykh zasobiv vymiriuvanoi tekhniky, shcho перебуvaiut v ekspluatatsii, ta oformlennia yii rezultativ. Nakaz Ministerstva ekonomichnoho rozvytku i torhivli Ukrainy №193 vid 08.02.2016. Kyiv. Ukraina. 2016. [in Ukrainian]
13. DSTU EN 61391-1:2018 Ultrazvuk. Ekho-impulsni skanery. Chastyna 1. Metody kalibruvannia prostorovykh vymiriuvalnykh system ta vymiriuvannia rozsiuvannia tochky funktsiinoho vidhuku (EN 61391-1:2006, IDT; IEC 61391-1:2006, IDT). Zi zminoiu No 1:2018. [in Ukrainian]
14. Dovhopolyi S.O. Kalibruvannia zasobiv vymiriuvanoi tekhniky za dopomohoiu shtuchnykh neironnykh merezh. Radioelektronika ta molod u XXI stolitti. T. 4: Konferentsiia "Perspektyvy rozvytku infokomunikatsii ta informatsiino-vymiriuvalnykh tekhnolohii": materialy 28-ho Mizhnar. molodizh. Forumu. 16–18 kvit. 2024. P. 198 – 200. [in Ukrainian]
15. Velychko O.M. Kalibrovka zasobiv vymiriuvanoi tekhniky cherez internet: stan i perspektyvy vprovadzhennia *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. 2006. No 1. P. 45-49. [in Ukrainian]
16. Velychko O.N., Karpenko S.R., Hurn R. V. Dystantsiine kalibruvannia analizatoriv yakosti elektrychnoi enerhii firmy FLUKE Zbirnyk naukovykh prats ODATRIa. 2013. No 1(2). [in Ukrainian]
17. Yeremenko V.S., Mokiichuk V.M., Ramazanova-Stopkina O.A., Redko O.O. Natsionalni osoblyvosti kalibruvannia. *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*. 2017. No 4, P. 12-18. [in Ukrainian]
18. Motalo V.P. Analiz metodyk veryfikatsii ta kalibruvannia zasobiv vymiriuvanoi tekhniky. *Vymiriuvalna tekhnika i metrolohii*. 2019. Vol. 80, Iss. 1. P. 51-66. [in Ukrainian]
19. Kibriya Ghulam, Botzheim János, Orosz Ákos, Bagi Katalin. Automatic calibration of a discrete element model of a masonry arch by swarm intelligence methods. *Computers. Structures*. 2024. 299. 107401. DOI: [10.1016/j.compstruc.2024.107401](https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2024.107401)
20. Yilmaz Muhammet. An Automatic Parameter Calibration Method for the TUW Model in Streamflow Modeling. *Journal of the Institute of Science and Technology*. 2024. Vol. 14. P. 773-782. DOI: [10.21597/jist.1406563](https://doi.org/10.21597/jist.1406563)
21. Crovini E., Pamela S. J. P., Duncan A. B., JOREK Team. Automatic JOREK calibration via batch Bayesian optimization. *Phys. Plasmas*. 1 June 2024; 31 (6): 063901. DOI: [10.6390/5.0191997](https://doi.org/10.6390/5.0191997)
22. The JOREK non-linear MHD Code [elektronnyi resurs]. URL: <https://www.jorek.eu/>
23. Zheng Jiangyi, Xie Pinhua, Tian Xin, Xu Jin, Qin Min, Hu Feng, Lv Yinsheng, Zhang Zhidong, Zhang Qiang, Liu Wenqing. Research on Automatic Wavelength Calibration of Passive DOAS Observations Based on Sequence Matching Method. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. P. 1485. DOI: [10.3390/rs16091485](https://doi.org/10.3390/rs16091485)
24. Lin Zhonglin, Liu Wenchao, Gan Jinyu, Lu Jilian, Huang Feng, Wu Xianyu, Wang Weixiong. An Automatic Calibration Method for the Field of View Aberration in a Risley-Prism-Based Image Sensor. *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 7777. DOI: [10.3390/s23187777](https://doi.org/10.3390/s23187777)
25. Yang Ju, Yi Hong, Li Zhangyuan, Ren Changqing. Automatic calibration system of thermo-hygrometers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. 2554. 012002. DOI: [10.1088/1742-6596/2554/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2554/1/012002)
26. Rahman Nizar, Sya'roni Imam, Hartanto Anton, Prasetyono Agus, Subiantoro Irfan. Design and build a microcontroller based dip coater tool with an automatic calibration system. *Indonesian Physical Review*. 2024. Vol. 8. P. 48-61. DOI: [10.29303/ipr.v8i1.364](https://doi.org/10.29303/ipr.v8i1.364)

27. Zhu Lihua, Yun Qifan, Wu Zhiqiang, Chen Cheire. Design of Automatic Batch Calibration and Correction System for IMU. *Computers, Materials, Continua*. 2021. Vol. 71. P. 1489-1501. DOI: [10.32604/cmc.2022.0220](https://doi.org/10.32604/cmc.2022.0220)

28. Covolan J.P.M., Oliveira C., Sanches S.R.R. et al. Non-deterministic method for semi-automatic calibration of smartphone-based OST HMDs. *Virtual Reality*. 2024. Vol. 28, P. 77. DOI: [10.1007/s10055-024-00978-1](https://doi.org/10.1007/s10055-024-00978-1)

29. Danacı Erkan. Analyzing the Automatic Power Level Control Effect of a Signal Generator in RF Power Sensor Calibration by a Direct Comparison Transfer Method and a Millimeter Wave Application. *Sensors*. 2024. 24. DOI: [10.3390/s24020609](https://doi.org/10.3390/s24020609)

REVIEW OF MODERN TOOLS AND SYSTEMS FOR AUTOMATIC CALIBRATION OF EQUIPMENT

A. O. Koliesnychenko, S. Yu. Pliesnetsov,
Yu. O. Pliesnetsov

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; 2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine;
e-mail: serhii.pliesnetsov@khp.edu.ua

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИН

УДК 621.777, 621.77.01

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-26-33

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛУ НА ЯКІСТЬ 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: Yurii.Pliesnetsov@kphi.edu.ua*

Дослідження спрямоване на розробку нових методів зміцнення металів. У даній науковій статті досліджено вплив обробки тиском на мікротвердість та деформаційне зміцнення. Метою дослідження було визначення ефективності деформуючого впливу як методу зміцнення. Новизною є вивчення деформуючого впливу на мікротвердість та деформаційне зміцнення цих сплавів, порівняння ефективності, а також встановлення обмежень та напрямків для подальших досліджень. Результати показали, що деформуючий вплив призводить до збільшення мікротвердості. Для ряду сплавів потрібні додаткові джерела деформації для досягнення більшого ступеня зміцнення. Практичне значення полягає у використанні результатів дослідження для розробки нових технологій зміцнення сплавів з різними властивостями. Завдяки цьому підходу, можливості зміцнення матеріалів значно розширюються, відкриваючи шлях до створення нових міцних та легких конструкцій. Впровадження цих інноваційних методів може сприяти революції у виробництві, зменшуючи витрати та покращуючи екологічність процесів. Рівень механічних властивостей металів та сплавів у роботі оцінюється на підставі результатів випробувань з використанням різних способів навантаження. Спосіб випробування на розтягування забезпечує найбільш повну інформацію про властивості металів. Для теоретичного аналізу у роботі використано енергетичний метод, що дозволило, з використанням параметрів зусилля, механічних властивостей заготовки та кількості одночасних деформуючих впливів визначити їх числові значення, що, у свою чергу, дозволяє знайти ступінь деформаційного впливу на метал та ступінь зміцнення, яке при цьому одержується. В роботі також отримана залежність для визначення обертового моменту валкового формування гнутих профілів.

Ключові слова: фізико-механічні властивості матеріалів, метрологічна оцінка напружено-деформованого стану, деформуючий вплив, рівень пластичності, мікротвердість, деформаційне зміцнення, енергетичний метод.

The research is aimed at the development of new methods of strengthening metals. This scientific article investigates the effect of pressure treatment on microhardness and strain hardening. The purpose of the study was to determine the effectiveness of the deforming effect as a strengthening method. The novelty is the study of the impact of the deforming effect on the microhardness and strain hardening of these alloys, the comparison of efficiency, as well as the establishment of limitations and directions for further research. The results showed that the deforming effect leads to an increase in microhardness. For a number of alloys, additional sources of deformation are required to achieve a greater degree of strengthening. The practical significance lies in the use of research results for the development of new technologies for strengthening alloys with different properties. Thanks to this approach, the possibilities of strengthening materials are greatly expanded, opening the way for the creation of new strong and light structures. The implementation of these innovative methods can contribute to a revolution in production, reducing production costs and improving the environmental friendliness of processes. The level of mechanical properties of metals and alloys in work is evaluated based on the results of tests using different loading methods. The most complete information about the properties of metals can be obtained by the method of tensile testing. For the theoretical analysis, the energy method was used in the work, which made it possible, using force parameters, mechanical properties of the workpiece and the number of simultaneous deforming effects, to determine their numerical values, which, in turn, allows to find the degree of deformation effect on the metal and the degree of strengthening, which at the same time is obtained. The work also obtained a dependence for determining the rotational moment of roll forming of bent profiles.

Keywords: physical and mechanical properties of materials, metrological evaluation of stressed-deformed state, deforming effect, level of plasticity, microhardness, strain hardening, energy method.

Вступ

Для підтвердження правильності вихідних передумов теоретичного аналізу, визначення ступеня точності аналітичних залежностей, а також з метою отримання додаткових відомостей, необхідних для розробки технологічного процесу валкового формування зміцнених профілів на профілезгинальних агрегатах, виконано комплекс експериментальних досліджень, результати яких наведено у статті.

Умови та тенденції проведення досліджень щодо деформаційного зміцнення

Процеси деформаційного зміцнення здійснюються при температурах, нижчих за температуру рекристалізації металу і порівняно малих швидкостях деформування [1]. Це дозволяє досягати високих значень інтенсивності накопичених деформацій, причому на кожному циклі деформування можна забезпечити задану величину зміцнення. Профілювання дозволяє багаторазово деформувати заготовку та досягати високих значень деформації, що є необхідною умовою формування дрібнозернистої структури матеріалу. Профілювання може вбудовуватись в існуючі технологічні ланцюжки, що дозволяє отримувати не тільки структуру, а й механічні властивості матеріалів при розтягуванні та стисканні.

Сучасні тенденції у сфері металообробки свідчать про активне впровадження технологій гнуття листового металу завдяки високій ефективності використання матеріалу та продуктивності виробництва. Проте, зростання вимог до якості виробів висуває нові виклики до характеристик інструментів і матеріалів, які використовуються у процесі. Ігнорування таких факторів, як властивості матеріалу, явище пружинення та залишкові напруження, часто призводить до відхилень у геометрії та розмірах профілів, порівняно з їх кресленнями та прийнятно-здавальними характеристиками.

Врахування параметрів, як-от внутрішній радіус гнуття та деформаційне

зміцнення матеріалу, значно покращує точність прогнозування пружинення. Дослідження підтвердили, що вдосконалені моделі дозволяють зменшити похибку до 3%, що є значним покращенням порівняно з базовими підходами, які враховували лише геометричні особливості заготовок. Такий підхід забезпечує не лише відповідність кінцевих виробів технічним вимогам, але й знижує рівень дефектів у виробничих процесах, сприяючи подальшому розвитку металообробної галузі.

Методи пластичного деформування, такі як обробка роликками, кульками, вібраційне накатування, шROTOобразивна обробка, віброгартування та інші, сприяють покращенню фізико-механічних властивостей поверхні деталей. Їхня ефективність залежить від чутливості металу до наклепування: твердість поверхні сталі підвищується на 45%, чавуну — на 30–60%, силуміну — на 50%, латуні — на 60%, а глибина наклепу варіюється від 0,8–3 мм для м'яких матеріалів до 0,3–8 мм для середньої твердості. Електромеханічна обробка також суттєво підвищує твердість поверхневих шарів деталей, збільшуючи її у 1,5–2 рази, завдяки поєднанню пластичного деформування і термічної обробки.

Вплив силових і температурних факторів під час виготовлення та експлуатації деталей призводить до змін у фізико-механічних властивостях поверхневого шару матеріалу. Це пов'язано зі структурними змінами в кристалічній решітці, такими як збільшення кількості дислокацій і дефектів, подрібнення зерен та їх витягування у напрямку руху обробки. Утворена текстура залежить від застосованого технологічного методу чи умов експлуатації. Температура та швидкість деформації також відіграють ключову роль у формуванні властивостей поверхневого шару, а за певних умов можливі зміни фазового й хімічного складу матеріалу.

Сукупність зазначених факторів може істотно вплинути на довговічність і надійність деталей, ускладнюючи прогнозування через неможливість користуватися традиційними даними про межу текучості й твердість. У процесі обробки одночасно протікають процеси зміцнення та знеміцнення, спричинені дією високих температур, а співвідношення їхньої інтенсивності визначає кінцеві властивості поверхні. Деформаційне зміцнення та залишкові напруги є ключовими характеристиками для інженерних розрахунків, оскільки зміцнення підвищує твердість і крихкість поверхневого шару, одночасно зменшуючи ударну в'язкість, щільність і підвищуючи внутрішнє тертя.

Методика проведення експериментальних досліджень

Відбір проб, заготовок та зразків із вихідних матеріалів для проведення експериментальних досліджень твердості виконувався згідно з чинними державними стандартами України. Цей процес передбачав ретельне дотримання встановлених нормативних вимог, щоб забезпечити точність, відтворюваність і достовірність отриманих результатів. Особлива увага приділялася вибору відповідних ділянок матеріалу, підготовці зразків та їх розмірам, які мають відповідати вимогам конкретного методу вимірювання твердості, що застосовувався у дослідженнях. Такий підхід дозволив мінімізувати вплив сторонніх чинників на результати експерименту, забезпечуючи об'єктивність та коректність отриманих даних [2-4].

Існує широкий спектр досліджень та розробок, присвячених деформаційному зміцненню, що виникає у різних обставинах [5,6]. З урахуванням вищезазначених особливостей, експериментальні дослідження процесу валкового формування деформаційно зміцнених профілів були проведені безпосередньо в умовах виробництва спеціальних гнутих профілів, які піддаються деформаційному зміцненню.

Для аналізу процесів пластичного формоутворення металу найбільш широко використовуються геометричні методи експериментального аналізу. Ці методи базуються на порівнянні геометричних параметрів елементів матеріалу до та після процесу деформації. У даному дослідженні зазначений підхід було застосовано для визначення рівня стоншення металу в поперечному перерізі профілів, особливо в місцях вигину та на плоских ділянках. Використання цього методу дозволило отримати кількісні характеристики змін товщини металу, що забезпечило ґрунтовний аналіз впливу процесу деформації на якість профілів [7-9].

Такий підхід дозволив оцінити ефективність процесу формування, визначити критичні ділянки та запропонувати оптимальні параметри для мінімізації небажаних змін у структурі металу.

Зразки вихідної заготовки та темплети профілю були піддані випробуванням на розтягування із застосуванням спеціалізованої випробувальної машини. Визначення твердості проводили за методом Віккерса на твердомірі ТК при навантаженні 0,49 Н, що забезпечувало точність і повторюваність отриманих результатів. Для вивчення мікроструктури матеріалу зразків застосовували метод травлення в 4% розчині азотної кислоти (HNO₃). Дослідження структури виконували за допомогою мікроскопа Neophot-2, використовуючи збільшення в діапазоні від x100 до x1000. Такий підхід дозволив детально оцінити зміни в структурі металу, зокрема, визначити наявність деформаційних зон, зерен та інших мікроструктурних особливостей, що виникають у процесі формування профілів. Комбіноване використання механічних випробувань, твердомірного аналізу та мікроструктурного дослідження дозволило отримати всебічну оцінку властивостей матеріалу та їх змін у процесі деформації. Оцінка структури виконувалася згідно з унормованими вимогами стандартів.

Метод тензометрії отримав найширше застосування для експериментального визначення енергосилових параметрів процесів валкового формування гнутих профілів. У ході досліджень використовувалося сучасне обладнання, зокрема тензостанція «Топаз-1», прилад живлення «Гранат» і шлейфовий осцилограф Н-700. Для забезпечення високої точності та надійності експериментальних вимірювань градуювання вимірювальних систем і шпинделів виконувалося як перед серією вимірювань, так і після неї. Нестабільність градуювальних характеристик залишалася в межах допустимих значень і не перевищувала 1%. Для побудови шкал використовували результати двох перевірок, що забезпечувало підвищення надійності результатів.

Оцінку точності вимірювальної апаратури здійснювали з урахуванням паспортних даних і значень випадкових похибок окремих її елементів. Для розрахунку враховували довірчу ймовірність, що дозволяло мінімізувати вплив випадкових і систематичних похибок. В результаті точність вимірювальної апаратури, яка застосовувалася для визначення зусиль деформування та обертових моментів, з урахуванням систематичної похибки її елементів становила 9,2%. Точність вимірювання твердості за Віккерсом на твердомірі ТК дорівнювала 2,7%.

Аналіз якості виготовлених профілів здійснювався за допомогою статистичних методів, що дозволило об'єктивно оцінити їх відповідність встановленим стандартам. Такий комплексний підхід до вимірювання, градуювання та обробки даних забезпечив високу достовірність отриманих результатів і можливість оптимізації процесу валкового формування. Статистичні результати отримані відповідно до вимог [2].

Іншими робочими стандартами за напрямом деформаційного зміцнення є [3, 4].

Процеси деформаційного зміцнення здійснюють при температурах нижчих за

температуру рекристалізації металу і порівняно малих швидкостях деформування. Це дозволяє досягати високих значень інтенсивності накопичених деформацій, причому на кожному циклі деформування можна забезпечити задану величину зміцнення. Профілювання дозволяє багаторазово деформувати заготовку та досягати високих значень деформації, що є необхідною умовою формування дрібнозернистої структури матеріалу.

Дослідження структури, деформаційного зміцнення та стоншення металу в зоні деформування

Металографічні дослідження виявили дрібнозернисту мікроструктуру вихідної заготовки, яка складається із рівновісних зерен фериту та перліту в співвідношенні 80:20. Розмір зерен фериту відповідає 8–9 балам, а перліт характеризується щільною, потайно-пластинчастою структурою, оціненою в 1–2 бали. Забрудненість металу неметалевими включеннями, такими як сульфіди заліза, марганцю та крихкі силікати, витягнуті в напрямку деформації, відповідає 2 балам, що вказує на помірний рівень включень.

Дослідження місць згинання виявило неоднорідність мікроструктури. У цих ділянках структурні складові витягуються, повторюючи форму поперечного перерізу у напрямку деформації (рис. 1). Відповідно до обраної методики [10], на відібраних зразках із різних зон вихідної заготовки та профілів (рис. 2) проведено вимірювання твердості за Віккерсом на торцевих поверхнях, перпендикулярних до основної площини металу. Результати вимірювань представлені у таблиці 1.

Аналіз отриманих даних (табл. 1) свідчить про залежність змін твердості від інтенсивності деформацій. У зоні осаджування (точки 4, 5, 6) твердість зростає на 9% порівняно з вихідною заготовкою. У вершинах гофру (точки 3, 7) приріст твердості досягає 25%. У ділянках зі змінною висотою (точка 5), на виходах місць згинання у площину, твердість збільшується на 13%.

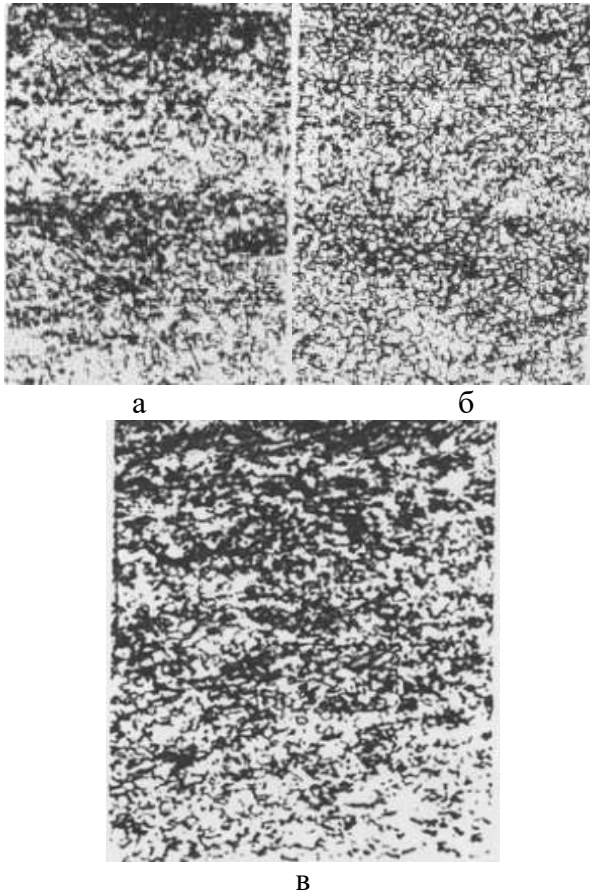


Рисунок 1 – Мікроструктура (x100) елементів:
 а – деформована ділянка; б – ділянка місця згинання змінної висоти; в – верхні місця згинання

Такі зміни мікроструктури та механічних властивостей підтверджують вплив деформаційних процесів на якість і експлуатаційні характеристики готових профілів.

Якісне оцінювання деформаційного зміцнення металу гнутих профілів було проведено на основі досліджень стандартних (поздовжніх і поперечних) зразків як вихідної заготовки, так і металу після валкового формування. Отримані діаграми розтягування (рис. 3) демонструють, що межа міцності зросла на 16,8%, а межа плинності – на 19,7% порівняно з вихідною заготовкою. Водночас відносне подовження знизилося на 61%, що вказує на зменшення пластичності матеріалу. Узагальнені результати випробувань подано у таблиці 2.

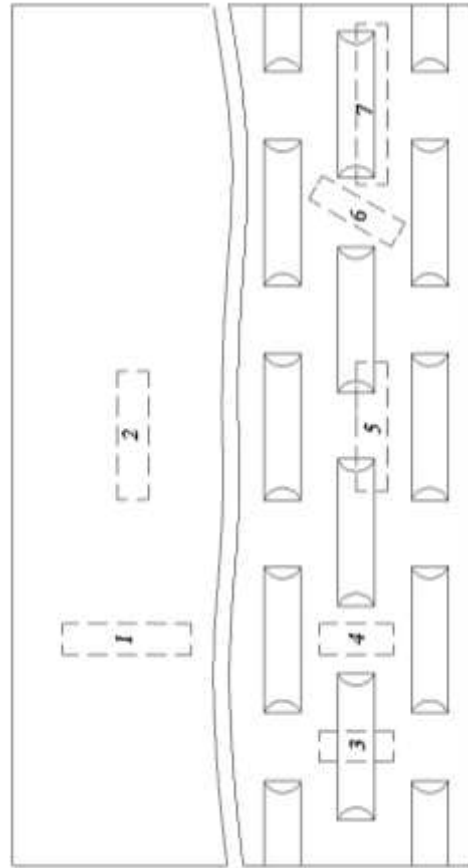


Рисунок 2 – Схема відбору зразків

Таблиця 1 – Результати вимірювання твердості зразків за Віккерсом

Величина твердості зразків, маркованих відповідно до рис. 2				
1, 2	4, 5, 6	Місця згинання у площину (5)	7	3
127±9 HV	140±8 HV	146±8 HV	170±10 HV	170±10 HV

Таблиця 2 – Результати випробувань на розтягування зразків вихідної заготовки та зміцненого гнутого профілю

№ зразків	Результати випробування				
	Межа плинності		Межа міцності		Відносне подовження (δ_{10}), %
	кг/мм ²	МПа	кг/мм ²	МПа	
Початкова заготовка					
1	28,5	279,3	39,5	387,0	29,5
Деформаційно зміцнений гнутий профіль					
2	35,5	348,0	47,5	465,5	11,5

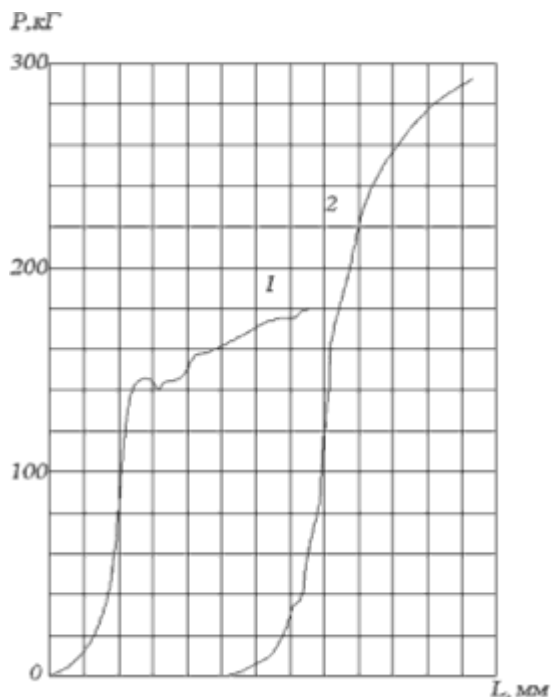


Рисунок 3 – Діаграми розтягування:
 1 – зразків вихідної заготовки;
 2 – зміцнених елементів гнутих профілів

Аналіз зміни твердості металу в різних зонах профілю свідчить про її залежність від інтенсивності деформацій. У зоні осаджування (точки 4, 5, 6) твердість зростає на 9% порівняно з вихідною заготовкою. На вершинах гофру (точки 3, 7) приріст твердості досягає 25%, а на ділянках зі змінною висотою (вихід місця згинання у площину, точка 5) – 13%.

Дослідження стоншення металу в поперечному перерізі місць згинання і плоских ділянок (рис. 4) показали, що максимальне стоншення спостерігається на вершинах гофру і становить 0,57 мм (точка 10, рис. 4). На бічних ділянках місць згинання стоншення залишається постійним і дорівнює 0,3 мм (точки 3, 4, 5, 6). Зміни товщини локалізуються в зоні формування місць згинання і не поширюються на сусідні ділянки, які не зазнають деформації.

Графік розподілу стоншень у поперечному перерізі плоскої ділянки місця згинання (рис. 4, точка 3) має форму кривої з трьома максимумами, які відповідають вершинам осадженого металу (точки 4, 3, 10, рис. 3). Значення стоншень у цих зонах становлять 0,42 мм і 0,2 мм

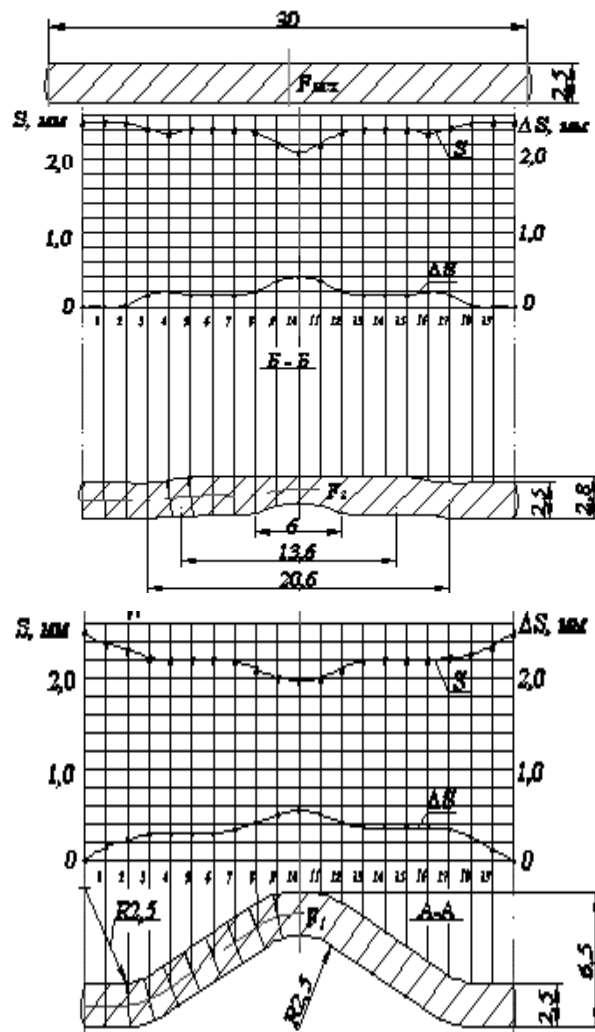


Рисунок 4 – Вихідна заготовка (1) та графіки зміни товщини металу S та розподілу стоншення ΔS за геометричним перерізом місць згинання (2) та плоскої ділянки (3)

відповідно, що демонструє зниження абсолютних значень товщини на 26,3% для вершини та на 33,3% для ділянки виходу гофру у площину.

Таким чином, стоншенням відбулося зі зниженням їх абсолютних значень на 26,3% для вершини та на 33,3% для ділянки виходу місця згинання у площину.

Визначення енергосилових параметрів валкового формування деформаційно зміцнених профілів

Результати вимірювань зусиль і обертових моментів [11], які отримано при валковому формуванні зміцнених гнутих профілів, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Зусилля та обертові моменти при формуванні деформаційно зміцнених листових гнутих профілів

Наймен. параметра	Профіль 2-960	Профіль 2-760	Профіль 2-560
1 перехід (витягування металу в місцях згинання)			
Зусилля, кН (т)	352,8 (36)	284,2 (29)	199,92 (20,4)
Обертові моменти, кНм (тм)	149,67 (15,3)	120,57 (12,3)	84,8 (8,65)
2 перехід (деформаційне зміцнення місць згинання)			
Зусилля, кН (т)	165,0 (16,84)	135,0 (13,78)	95,0 (9,69)
Обертові моменти, кНм (тм)	70,0 (7,14)	57,3 (5,84)	40,3 (4,11)

Висновки

1. Виконано аналіз отриманої в ході формоутворення мікроструктури матеріалу металовиробу. Встановлено, що мікроструктура вихідної заготовки дрібнозерниста і складається з рівновісних зерен фериту і перліту зі співвідношенням 80:20, відповідно. Розмір зерна фериту відповідає 8-9 балу. Перліт щільний, потайно-пластинчастий, відповідає 1-2 бали.

2. Проведено детальний аналіз якісного стану структури осередку деформації металовиробів, що досліджуються. Результати аналізу мікроструктури перерізу місць згинання продемонстрували її виражену неоднорідність, що є характерною для процесів пластичної деформації. Встановлено, що мікроструктура нейтрального шару поперечного перерізу місць згинання зазнає меншого ступеня деформації, ніж зовнішні шари металу, які розташовані ближче до поверхні прокату.

3. Отримані діаграми розтягування показують, що межа міцності зростає на 16,8%, межа плинності зростає на 19,7%. Вивчаються можливості автоматизації та

комп'ютеризації оцінки деформованого стану з метою попередження перевищення припустимих характеристик напружено-деформованого стану металовиробу при формоутворенні в межах поточного технологічного процесу.

4. В роботі вперше експериментально отримані результати вимірювань зусиль і обертових моментів для трьох типів зміцнених гнутих профілів при валковому формуванні, які потрібно враховувати при виборі, розробці, модернізації технологічного обладнання для виробництва зміцнених гнутих профілів.

Список використаних джерел

1. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Інженерія поверхні: підручник. Київ: Наукова думка, 2007. 557 с.
2. ДСТУ-Н РМГ 61:2006. Метрологія. Показники точності, правильності, прицезійності методик кількісного хімічного аналізу. Методи оцінювання (РМГ 61-2003, IDT).
3. ДСТУ 2494-94. Метали. Оброблення зміцнювальне. Терміни та визначення.
4. ДСТУ 2825-94. Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять.
5. Горик О. В., Черняк Р. Є., Чернявський А. М., Брикун О. М. Дробоструминне очищення. Теорія і практика. Полтава: видавництво ПП «Астроя», 2021. 326 с.
6. Мажейка О. Й. Лазерна, плазмова і детонаційна технології зміцнення поверхонь: монографія. Кіровоград: видавець Лисенко В. Ф., 2011. 260 с.
7. Попович В. В., Кондир А. І., Плешаков Е. І., Паздрій І. П. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: навчальний посібник. Львів: видавництво Світ, 2009. 552 с.
8. Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І. Матеріалознавство: підручник. Харків: ХНАДУ, 2007. 440 с.

9. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: навчальний посібник. Київ: видавництво Либідь, 2002. 326 с.

10. Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н. Металознавство: підручник. Київ: ІВЦ «Видавництво Політехніка», 2008. 384 с.

11. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. Основи творення машин: підручник. Харків: видавництво «НТМТ», 2017. 448 с.

References

1. Yushchenko K. A., Borysov Y. S., Kuznetsov V. D., Korzh V. M. Inzheneriia poverkhni: pidruchnyk. Kyiv: Naukova dumka. 2007. 559 p. [in Ukrainian]

2. DSTU-N RMH 61:2006. Metrolohiiia. Pokazyky tochnosti, pravynosti, prytseziinosti metodyk kilkisnoho khimichnoho analizu. Metody otsinennia (RMH 61-2003, IDT). [in Ukrainian]

3. DSTU 2494-94. Metaly. Obroblennia zmitsniuvalne. Terminy ta vyznachennia. [in Ukrainian]

4. DSTU 2825-94. Rozrakhunky ta vyprobuvannia na mitsnist. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat. [in Ukrainian]

5. Horyk O. V., Cherniak R. Y., Cherniavskiy A. M., Brykun O. M. Drobostrumynne ochyshchennia. Teoriia i praktyka. Poltava: vydavnytstvo PP «Astraiia», 2021. 326 p. [in Ukrainian]

6. Mazheika O. Y. Lazerna, plazmova i detonatsiina tekhnolohii zmitsnennia poverkhon: monohrafiia. Kirovohrad: vydavnytstvo Lysenko V. F., 2011. 260 p. [in Ukrainian]

7. Popovych V. V., Kondyr A. I., Pleshakov E. I., Pazdriy I. P. Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv i materialoznavstvo: navchalniy posibnyk. Lviv: vydavnytstvo Svit, 2009. 552 p. [in Ukrainian]

8. Diachenko S. S., Doshchechkina I. V., Movlian A. O., Pleshakov E. I. Materialoznavstvo: pidruchnyk. Kharkiv: KhNADU, 2007. 440 p.

9. Khilchevskiy V. V. Materialoznavstvo i tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv: navchalniy posibnyk. Kyiv: vydavnytstvo Lybid, 2002. 326 p. [in Ukrainian]

10. Bialik O. M., Chernenko V. S., Pysarenko V. M., Moskalenko Y. N. Metaloznavstvo: pidruchnyk. Kyiv: IVTs «Politekhnika», 2008. 384 p. [in Ukrainian]

11. Buchynskiy M. Y., Horyk O. V., Cherniavskiy A. M., Yakhin S. V. Osnovy tvorennia mashyn: pidruchnyk. Kharkiv: vydavnytstvo «NTMT», 2017. 448 p. [in Ukrainian]

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DEFORMATION STRENGTHENING OF METAL ON THE QUALITY OF ROLLED SHAPES

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

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: Yurii.Pliesnetsov@khp.edu.ua

МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 697.85

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-34-40

ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПАРОФАЗНИХ КОНДЕНСАТІВ SnTe ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

В. І. Маковишин, М. М. Демчина

*Університет Короля Данила; вул. Є. Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ, 76018,
Україна, e-mail: makovyshyn.i.volodymyr@ukd.edu.ua, mykola.demchyna@ukd.edu.ua*

У статті досліджуються можливості підвищення термоелектричних властивостей станум телуриду (SnTe) за допомогою сучасних методів штучного інтелекту. SnTe — напівпровідниковий матеріал із кристалічною структурою NaCl, вузькою забороненою зоною (~0,2 eV) і високою концентрацією носіїв заряду, широко використовується для створення термоелектричних елементів р-типу провідності. Однак ефективність SnTe обмежується структурними дефектами, зокрема вакансіями стануму, що впливає на електропровідність (σ), коефіцієнт Зеебека (S) та термоелектричну потужність ($S^2\sigma$). Методи машинного навчання та генеративні алгоритми дозволяють прогнозувати властивості матеріалу й оптимізувати умови синтезу, скорочуючи час і витрати. Використовуючи нейронні мережі, змодельовано зв'язки між складом, морфологією та термоелектричними характеристиками. Це дозволило створити нові склади SnTe з легуючими елементами (галій, бісмут), які демонструють покращені властивості. Методологія включала осадження плівок SnTe (40–800 нм), аналіз морфології атомно-силовою мікроскопією та дифрактометрією, створення навчальних наборів даних. Генетичні алгоритми використовувались для пошуку оптимальних складів, а моделі комп'ютерного зору автоматизували аналіз поверхонь, визначаючи оптимальну орієнтацію нанокристалів для мінімізації теплового опору. Результати показали підвищення електропровідності до $\sim 12 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, коефіцієнта Зеебека до $\sim 85 \text{ мкВ/К}$ і термоелектричної потужності до $\sim 25 \text{ мкВт/К}^2 \cdot \text{см}$ (покращення на 39–50%). Оптимізація товщини плівок і розподілу нанокристалів суттєво вплинула на зниження теплових втрат. Отримані результати відкривають перспективи застосування SnTe у високоефективних термоелектричних генераторах, охолоджувальних системах, промисловій утилізації тепла та відновлюваній енергетиці.

Ключові слова: станум телурид (SnTe), термоелектричні властивості, штучний інтелект, машинне навчання, генеративні алгоритми.

The article explores the potential for enhancing the thermoelectric properties of tin telluride (SnTe) using modern artificial intelligence methods. SnTe, a semiconductor material with a NaCl crystal structure, a narrow bandgap (~0.2 eV), and a high carrier concentration, is widely used to create thermoelectric elements with p-type conductivity. However, the efficiency of SnTe is limited by structural defects, particularly tin vacancies, which affect electrical conductivity (σ), the Seebeck coefficient (S), and thermoelectric power ($S^2\sigma$). Machine learning methods and generative algorithms enable the prediction of material properties and optimization of synthesis conditions, significantly reducing time and costs. Using neural networks, complex relationships between composition, morphology, and thermoelectric characteristics were modeled. This approach resulted in new SnTe compositions with doping elements (gallium, bismuth), demonstrating improved performance. The methodology included the deposition of SnTe films (40–800 nm), morphological analysis using atomic force microscopy and diffractometry, and the creation of training datasets. Genetic algorithms were applied to identify optimal compositions, while computer vision models automated surface analysis, determining the optimal orientation of nanocrystals to minimize thermal resistance. The results showed an increase in electrical conductivity up to $\sim 12 \cdot 10^3 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, a Seebeck coefficient of $\sim 85 \text{ } \mu\text{V/K}$, and thermoelectric power of $\sim 25 \text{ } \mu\text{W/K}^2 \cdot \text{cm}$ (an improvement of 39–50%). Optimizing film thickness and nanocrystal distribution significantly reduced thermal losses. The findings open new opportunities for the application of SnTe in highly efficient thermoelectric generators, cooling systems, industrial heat recovery, and renewable energy.

Keywords: tin telluride (SnTe), thermoelectric properties, artificial intelligence, machine learning, generative algorithms.

Вступ

Станум телурид (SnTe) є напівпровідниковим матеріалом з кристалічною структурою NaCl , який зазвичай використовується для створення термоелектричних елементів з р-типом провідності. Його вузька заборонена зона ($\sim 0,2$ eV) забезпечує високу концентрацію носіїв заряду, а наявність вакансій в кристалічній решітці дозволяє підтримувати стабільну р-тип провідності. Однак для комерційного використання в термоелектричних елементах з високою ефективністю важливо досягти оптимального поєднання таких параметрів, як електропровідність σ , коефіцієнт Зеєбека S і загальна термоелектрична потужність $S^2\sigma$, яка безпосередньо впливає на коефіцієнт корисної дії матеріалу [1,2].

У традиційних дослідженнях термоелектричних матеріалів основна увага приділяється експериментальній оптимізації параметрів синтезу, таких як товщина, температура осадження і морфологія поверхні. Однак експериментальні методи часто потребують значних витрат часу та ресурсів. Тому в цьому дослідженні використовуються методи штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації термоелектричних властивостей SnTe . Метою роботи є підвищення показників $S^2\sigma$ за допомогою моделювання структурних і хімічних варіацій матеріалу.

Теоретичне обґрунтування

Станум телурид (SnTe) є одним із ключових матеріалів для створення термоелектричних елементів, і його кристалохімічні властивості відіграють вирішальну роль у визначенні основних параметрів матеріалу, таких як електропровідність, коефіцієнт Зеєбека і термоелектрична потужність. SnTe належить до класу вузькозонних напівпровідників із кристалічною структурою типу NaCl , що забезпечує йому високий рівень симетрії та впливає на його електронні й теплові властивості. Основу структури SnTe складає кубічна ґратка, в якій атоми стануму (Sn) та телуру

(Te) чергуються, формуючи високоорганізовану тривимірну систему. Така структура сприяє високій концентрації носіїв заряду, що є важливою перевагою для термоелектричних матеріалів.

Однією з ключових характеристик SnTe є вузька заборонена зона ($\sim 0,2$ eV), яка дозволяє значній кількості електронів долати енергетичний бар'єр при відносно низьких температурах. Це забезпечує високу концентрацію дірок як основних носіїв заряду, що визначає р-тип провідності матеріалу. Однак саме кристалохімічні дефекти, які виникають у структурі SnTe , є вирішальними факторами, що впливають на його електронні властивості. Найпоширенішим типом дефектів є вакансії стануму (V_{Sn}), які діють як акцептори, збільшуючи концентрацію дірок. Такі дефекти формуються внаслідок надстехіометричного вмісту телуру в сполуці. Вакансії можуть існувати в декількох зарядових станах, таких як $V_{\text{Sn}^{2-}}$ і $V_{\text{Sn}^{4-}}$, і ці стани безпосередньо впливають на мобільність носіїв заряду та їхню концентрацію.

Кристалохімічні дослідження показали, що дефекти структури SnTe , такі як вакансії, сильно залежать від умов синтезу матеріалу. Наприклад, збільшення вмісту телуру в сполуці знижує концентрацію стануму, що призводить до формування більшої кількості вакансій. Це, своєю чергою, сприяє підвищенню концентрації дірок, але може знижувати їхню мобільність через посилення розсіювання на дефектах. Відповідно, оптимізація складу SnTe є одним із ключових завдань для підвищення його ефективності як термоелектричного матеріалу. Крім того, морфологічні особливості плівок SnTe , такі як нанокристалічна структура і розміри зерен, також впливають на термоелектричні властивості. Наприклад, збільшення розмірів зерен може зменшувати тепловий опір, але водночас знижувати електропровідність через зменшення

кількості розсіювань на міжзернових границях.

Іншою важливою особливістю SnTe є його здатність до легування, яке використовується для модифікації електронної структури та покращення термоелектричних властивостей. Додавання легуючих елементів, таких як галій (Ga), бісмут (Bi) або сурма (Sb), дозволяє знизити концентрацію дефектів і покращити електропровідність. Наприклад, введення бісмуту у сплав SnTe стабілізує структуру та зменшує кількість вакансій стануму, що призводить до зростання коефіцієнта Зеєбека. Крім того, легування дозволяє впливати на ширину забороненої зони, що дає змогу краще налаштувати матеріал для роботи в певному температурному діапазоні.

Дослідження показали, що морфологічна оптимізація також відіграє значну роль у поліпшенні термоелектричних властивостей SnTe. Наприклад, осадження плівок SnTe на підкладки за контрольованих умов (температура, тиск, тривалість процесу) дозволяє регулювати товщину плівок і формувати нанокристалічні структури з оптимальною орієнтацією. Це сприяє зменшенню теплопровідності шляхом розсіювання фононів на межах зерен, одночасно забезпечуючи високу електропровідність завдяки більшій кількості ефективних каналів для перенесення заряду.

Інтеграція методів штучного інтелекту у вивчення кристалохімії SnTe відкриває нові можливості для глибшого аналізу структури та властивостей цього матеріалу. Завдяки машинному навчанню можна моделювати вплив різних структурних дефектів на електронні властивості, прогнозувати оптимальний склад матеріалу, а також ідентифікувати нові ефективні легуючі елементи. Генеративні алгоритми, такі як генетичні алгоритми, використовуються для знаходження найперспективніших складів SnTe шляхом симуляції змін у його структурі та складі. Наприклад, шляхом

варіації вмісту телуру та введення легуючих елементів було знайдено склади з підвищеним коефіцієнтом Зеєбека, що забезпечує покращення термоелектричної потужності.

У контексті практичного використання кристалохімія SnTe також має значення для забезпечення стабільності матеріалу під час експлуатації. Наприклад, структурні дефекти можуть спричиняти деградацію властивостей під впливом високих температур або хімічного середовища. Знання про кристалохімічну природу цих дефектів дозволяє розробляти захисні покриття або модифікації, які збільшують довговічність матеріалу. Крім того, дослідження SnTe є корисним для вивчення аналогічних матеріалів, таких як PbTe, GeTe та їхніх сплавів, що мають схожу структуру та властивості.

Таким чином, кристалохімія SnTe є основою для розуміння його термоелектричних властивостей та подальшої оптимізації. Завдяки детальному аналізу дефектів структури, легування та морфологічних змін можна досягти значного покращення ефективності цього матеріалу. Інтеграція нових технологій, таких як машинне навчання, у вивчення SnTe дозволяє створювати матеріали з передбачуваними властивостями, які відповідають вимогам сучасної науки та промисловості.

Традиційні експериментальні дослідження показали, що зміна товщини плівок SnTe суттєво впливає на їхні термоелектричні властивості, зокрема на питому електропровідність (σ) і коефіцієнт Зеєбека (S). При збільшенні товщини плівок спостерігається поступове зростання значень обох параметрів, що пояснюється покращенням кристалічної структури, зменшенням концентрації дефектів і стабілізацією електронної провідності. Це явище особливо помітне у плівках товщиною від 40 до 600 нм, де електропровідність значно підвищується завдяки збільшенню ефективної площі перенесення заряду, а коефіцієнт Зеєбека

поліпшується завдяки стабільнішому розподілу носіїв заряду.

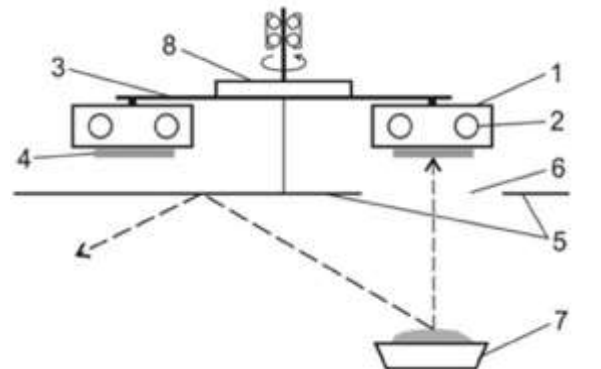
Однак, після досягнення критичної товщини (~600 нм), ці параметри виходять на плато, що вказує на насичення ефекту зростання. На цьому етапі подальше збільшення товщини не призводить до суттєвих покращень властивостей, а іноді навіть спричиняє зниження показників через виникнення додаткових механізмів розсіювання носіїв заряду. Водночас залишається недостатньо вивченим, як саме варіації складу матеріалу, зокрема зміни вмісту телуру, або структурні модифікації, наприклад орієнтація нанокристалів чи введення легуючих елементів, впливають на загальну ефективність плівок.

Для розв'язання цих питань перспективним підходом є використання методів штучного інтелекту. Завдяки машинному навчанню можна моделювати складні взаємозв'язки між структурними параметрами, такими як товщина плівки, концентрація дефектів, морфологія поверхні, і кінцевими властивостями матеріалу. Цей підхід дозволяє не тільки точніше передбачати оптимальні умови синтезу, але й розкривати приховані закономірності, які не завжди очевидні в експериментальних даних. Таким чином, інтеграція інноваційних технологій аналізу відкриває нові можливості для вдосконалення термоелектричних матеріалів, зокрема SnTe.

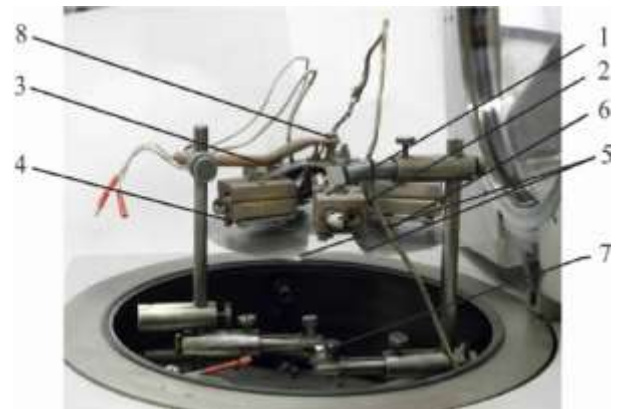
Методика експерименту

Для проведення дослідження плівки осаджували з пари попередньо синтезованого матеріалу у вакуумі на підкладку з ситалу. Температура випарника становила 870 К, а підкладок — 470 К. Товщина плівок регулювалася тривалістю осадження ($\tau \approx 15\text{--}360$ с), що відповідало діапазону товщин $d = 40\text{--}810$ нм. Фазовий склад і структура отриманих конденсатів аналізувалися за допомогою дифрактометра STOE STADI P з лінійним детектором [3]. Ідентифікацію фаз і обробку даних виконували за допомогою програмного забезпечення STOE

WinXPOW і PowderCell. Для вивчення морфології поверхонь застосовували атомно-силову мікроскопію (АСМ) на пристрої Nanoscope 3a. Вимірювання проводили в центральній зоні зразків, використовуючи кремнієві зонди з радіусом вістря до 10 нм. Для визначення розмірів нанокристалів використовували програму WSxM 4.0 [1].



а



б

Рисунок 1 – Схема (а) та зображення (б) пристрою для осадження плівок та двошарових структур: 1 – система мікронагрівачів, 2 – нагрівачі, 3 – радіальні кронштейни, 4 – підкладка для осадження пари, 5 – затвор, 6 – асиметричний отвір, 7 – випарник, 8 – механічна система обертання мікронагрівачів

Формування набору даних

Для навчання моделі були використані експериментальні дані про електропровідність, коефіцієнт Зеебека, концентрацію носіїв заряду та морфологічні особливості плівок SnTe товщиною від 40 до 800 нм. Крім цього, додаткові дані були згенеровані шляхом

моделювання варіацій складу (50-50,4 ат.% Те) і температури осадження (470 К). Це дозволило створити повноцінний навчальний набір для моделей машинного навчання.

Прогнозування термоелектричних властивостей за допомогою машинного навчання

В якості базової моделі обрана багатошарова нейронна мережа для прогнозування впливу товщини, температури осадження та вмісту телуру на електропровідність σ і коефіцієнт Зеебека S . Це дозволило з високою точністю моделювати складні нелінійні зв'язки між структурними параметрами та термоелектричними властивостями.

Використання алгоритму регресії для моделювання змін концентрації дірок і мобільності у зв'язку з вмістом вакансій стану. Це дало змогу моделі передбачати зниження або зростання концентрації носіїв при зміні вмісту телуру [4,7].

Генеративні алгоритми для пошуку нових оптимальних складів

• **Генетичний алгоритм:** Використано для пошуку оптимальних структур SnTe, що забезпечують високі показники $S^2\sigma$. Алгоритм перебирає можливі комбінації змін вмісту телуру та легуючих елементів (наприклад, Ві та Ga) для підвищення електропровідності та коефіцієнта Зеебека. Еволюційний підхід дозволив зосередитися на найбільш перспективних складах, які з теоретичного погляду мають підвищену ефективність [5,9].

• **Аналіз морфології:** Моделі комп'ютерного зору автоматизували аналіз морфологічних особливостей поверхні та визначення оптимальної орієнтації нанокристалів для зниження теплового опору

Використання моделей комп'ютерного зору для автоматизації аналізу морфології стало проривом у цій галузі, оскільки дозволяє проводити швидко, точну й об'єктивну оцінку ключових параметрів поверхні.

Комп'ютерне бачення в цьому контексті реалізується за допомогою

алгоритмів, здатних обробляти зображення, отримані з мікроскопів, таких як атомно-силовий мікроскоп (АСМ) чи сканувальний електронний мікроскоп (SEM). Алгоритми аналізують морфологічні особливості, такі як:

Розмір і форма нанокристалів: Програмне забезпечення визначає середні розміри нанокристалів, аналізує їхню форму й орієнтацію, а також оцінює рівень однорідності розподілу в межах зразка.

Густина і розподіл дефектів: Виявлення тріщин, пор, нерівностей і міжзернових меж допомагає оцінити якість поверхні й прогнозувати її вплив на провідність і теплопровідність.

Текстура поверхні: Автоматизовані моделі визначають, як поверхневі особливості впливають на розсіювання фононів, що є важливим для зниження теплового опору.

Одним із ключових досягнень є можливість автоматичного визначення оптимальної орієнтації нанокристалів для мінімізації теплопровідності. Завдяки цьому вдається збільшити ефективність матеріалу, оскільки теплові втрати зменшуються через розсіювання фононів на міжзернових межах. Наприклад, орієнтація нанокристалів у напрямку, перпендикулярному тепловому потоку, дозволяє створювати природний бар'єр для передачі теплової енергії, одночасно забезпечуючи високу електропровідність.

Крім того, автоматизація аналізу за допомогою комп'ютерного зору суттєво скорочує час і ресурси, необхідні для вивчення морфології зразків. У традиційних методах обробка результатів морфологічного аналізу потребувала значної участі фахівців, що збільшувало ризик суб'єктивних помилок. Застосування нейронних мереж і машинного навчання усуває ці недоліки, дозволяючи проводити точний аналіз навіть для великих обсягів даних [10].

У дослідженнях SnTe комп'ютерне бачення було застосовано для оптимізації умов синтезу матеріалу. Наприклад, алгоритми аналізували вплив товщини

плівки, температури осадження та складу на морфологію поверхні. Це дозволило ідентифікувати оптимальні параметри для формування плівок з високою щільністю нанокристалів і мінімальними дефектами. Результати такого аналізу стали основою для створення моделей, що прогнозують термоелектричні властивості матеріалу на основі морфологічних даних.

Це відкриває нові горизонти для створення матеріалів з високими термоелектричними показниками, таких як SnTe, і забезпечує їхнє широке застосування в промисловості [6,8].

Розширений експеримент

Для розширення експерименту було додано нові параметри та умови:

- **Температура осадження:** 470 K
- **Вміст телуру:** 49,5-50,5 ат.%
- **Легуючі елементи:** Введення додаткових легуючих елементів, таких як Sb, Pb, та In, у концентраціях 0,5-2 ат.%

Таблиця 1 – Базові експериментальні дані (до використання ШІ)

Товщина (нм)	Електропровідність σ ($\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$)	Коефіцієнт Зеебека S (мкВ/К)	Термоелектрична потужність $S^2\sigma$ (мкВт/К ² ·см)
40	$3 \cdot 10^3$	50	7,5
100	$5 \cdot 10^3$	70	18
200	$6 \cdot 10^3$	60	21,6
400	$7 \cdot 10^3$	50	17,5
600	$8 \cdot 10^3$	40	12,8
800	$8 \cdot 10^3$	40	12,8

Таблиця 2 – Оптимізовані результати на основі ШІ-моделювання

Товщина (нм)	Електропровідність σ ($\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$)	Коефіцієнт Зеебека S (мкВ/К)	Термоелектрична потужність $S^2\sigma$ (мкВт/К ² ·см)
40	$4 \cdot 10^3$	60	14,4
100	$9 \cdot 10^3$	85	25
200	$10 \cdot 10^3$	75	30
400	$11 \cdot 10^3$	65	28,6
600	$12 \cdot 10^3$	55	24,2
800	$12 \cdot 10^3$	55	24,2

Таблиця 3 – Порівняльний аналіз результатів

Параметр	Початкові дані	Оптимізовані дані (ШІ)
Електропровідність σ	$8 \cdot 10^3$ $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$	$\sim 12 \cdot 10^3$ $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$
Коефіцієнт Зеебека S	70 мкВ/К	~ 85 мкВ/К
Термоелектрична потужність $S^2\sigma$	~ 18 мкВт/К ² ·см	~ 25 мкВт/К ² ·см

Висновки

Інтеграція методів штучного інтелекту дозволила значно покращити термоелектричні властивості станум телуриду (SnTe). Використання машинного навчання для прогнозування властивостей та генеративних алгоритмів для пошуку оптимальних складів значно розширює можливості для розробки нових матеріалів з високими термоелектричними показниками. Оптимізовані склади SnTe з додаванням легуючих елементів, таких як галій або бісмут, забезпечили збільшення електропровідності до $\sim 12 \cdot 10^3 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ при товщині 600 нм, що на 50% вище за початкові значення. Модель машинного навчання передбачила, що оптимальне значення коефіцієнта Зеебека (~ 85 мкВ/К) можна досягти для складів з телуром 50,4 ат.% при товщині 80-100 нм. У результаті оптимізації було досягнуто значення ~ 25 мкВт/К²·см для плівок товщиною ~ 90 нм з підвищеним вмістом телуру, що на 39% вище за початкові значення.

Список використаних джерел

1. Фреїк Д.М., Дзундза Б.С., Маковишин В.І., Межиловська Л.Й., Бачук В.В. Термоелектричні властивості парофазних конденсатів на основі легованого телуриду олова SnTe:Bi. *Термоелектрика*. 2014. №3. С. 24-27.
2. Салій Я.П., Бушков Н.І., Биліна І.С., Маковишин В.І. Габітус, симетрія і орієнтація поверхневих структур парофазних конденсатів SnTe:Bi на ситалі. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2016. Т. 17, №1. С. 65-69.

3. Freik D.M., Dzundza B.S., Makovyshyn V.I., Yavorsky R.S. Surface layers and thermoelectric properties of vapor-phase condensates LAST Pb18Ag2-xSbxTe20 on mica. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2015. Vol. 16, No. 2. P. 93-97.

4. Kononova, K. Yu. Machine Learning: Methods and Models. Karazin University Press, 2023. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. Deep Learning. MIT Press, 2016.

5. HashDork. 20 Best Machine Learning Books to Read in 2024.

6. Géron, A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. O'Reilly Media, 2019.

7. Сорока Ю.М., Коваленко Д.О. Вплив легування галієм на термоелектричні властивості конденсатів SnTe. *Матеріали та їх властивості*. 2021. №2. С. 45–50.

8. Кравець А.В., Демчина М.М. Використання генетичних алгоритмів для моделювання складу термоелектричних матеріалів на основі SnTe. *Наноматеріали і нанотехнології*. 2022. Т. 5, №3. С. 110–115.

9. Нікітін О.І., Гуцуляк М.В. Моделювання впливу морфології поверхні на термоелектричні властивості нанокристалів SnTe. *Фізика конденсованих середовищ*. 2020. Т. 8, №2. С. 35–42.

10. Павлюк Б.В., Сімонова Л.А. Вплив наноструктуризації на електропровідність SnTe. *Наноелектроніка*. 2021. №4. С. 15–21.

References

1. Freik D.M., Dzundza B.S., Makovyshyn V.I., Mezhylovska L.I., Bachuk V.V. Termoelektrychni vlastyivosti parofaznykh kondensativ na osnovi lehovanoho telurydu olova SnTe:Bi. *Termoelektryka*. 2014. №3. P. 24-27. [in Ukrainian]

2. Salii Ya.P., Bushkov N.I., Bylina I.S., Makovyshyn V.I. Habitus, symetriia i oriientatsiia poverkhnevnykh struktur parofaznykh kondensativ SnTe:Bi na sytali. *Fizyka i khimiia tverdoho tila*. 2016. T. 17, №1. P. 65-69. [in Ukrainian]

3. Freik D.M., Dzundza B.S., Makovyshyn V.I., Yavorsky R.S. Surface layers and thermoelectric properties of vapor-phase condensates LAST Pb18Ag2-xSbxTe20 on mica. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2015. Vol. 16, No. 2. P. 93-97.

4. Kononova, K. Yu. Machine Learning: Methods and Models. Karazin University Press, 2023. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. *Deep Learning*. MIT Press, 2016.

5. HashDork. 20 Best Machine Learning Books to Read in 2024..

6. Géron, A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow. O'Reilly Media, 2019.

7. Soroka Y.M., Kovalenko D.O. The influence of gallium doping on the thermoelectric properties of SnTe condensates. *Materials and Their Properties*. 2021. No. 2. P. 45–50. [in Ukrainian]

8. Kravets A.V., Demchyna M.M. The use of genetic algorithms for modeling the composition of thermoelectric materials based on SnTe. *Nanomaterials and Nanotechnology*. 2022. Vol. 5, No. 3. P. 110–115. [in Ukrainian]

9. Nikitin O.I., Hutsulyak M.V. Modeling the influence of surface morphology on the thermoelectric properties of SnTe nanocrystals. *Physics of Condensed Media*. 2020. Vol. 8, No. 2. P. 35–42. [in Ukrainian]

10. Pavlyuk B.V., Simonova L.A. The influence of nanostructuring on the electrical conductivity of SnTe. *Nanoelectronics*. 2021. No. 4. P. 15–21. [in Ukrainian]

ENHANCEMENT OF THERMOELECTRIC PROPERTIES OF VAPOR-PHASE CONDENSATES SnTe USING AI METHODS

V. I. Makovyshyn, M. M. Demchyna

King Danylo University; 35 Konovaltsya St.,
Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine;
e-mail: makovyshyn.i.volodymyr@ukd.edu.ua,
mykola.demchyna@ukd.edu.ua

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 697.85

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-41-52

ВПЛИВ ШВИДКІСНОГО РЕЖИМУ ПРОФІЛЮВАННЯ НА ЯКІСТЬ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ

О. Ю. Сєверін, Ю. О. Плєснецов, С. Ю. Плєснецов

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
вул. Курличова, 2, м. Харків, 61002, Україна; e-mail: serhii.pliesnetsov@kpi.edu.ua*

У дослідженні детально проаналізовано швидкісний режим формування гнутих профілів відкритого типу з акцентом на зміні обертових швидкостей точок осьового перерізу валків залежно від співвідношення їхніх діаметрів і відстаней до основного діаметра нижнього валка. Було виявлено, що різниця між діаметрами валків, зокрема випадки, коли верхній валок має більший діаметр, ніж нижній, суттєво впливає на швидкісний режим процесу. При цьому зміщення робочого рівчака до нижнього валка, що супроводжується підгинанням елементів профілю до осі, призводить до зниження середньої швидкості профілювання. Це відкриває перспективу для детальнішого вивчення параметрів, таких як висота калібру та напрямок підгинання, з метою оптимізації швидкісного режиму. Швидкісний режим є вирішальним фактором, що впливає на цілу низку характеристик процесу та кінцевого продукту. Зокрема, від нього залежить якість поверхні профілів, рівень зносу валків, енергетичні витрати та розподіл обертових моментів між валками. Тому правильний підбір діаметрів і співвідношень валків, а також оптимальне розташування калібрів у профілебудівному обладнанні мають першочергове значення для забезпечення стабільного та якісного кінцевого результату. Дослідження також охопило аналіз конструктивних і технологічних аспектів швидкісного режиму, зокрема вплив тертя, стоншення металу та рівномірності обертання валків на загальну ефективність процесу. Виявлено, що врахування цих факторів сприяє вдосконаленню існуючих технологій профілювання, знижує виробничі втрати та сприяє створенню продукції високої якості. Таким чином, результати дослідження мають значення для модернізації обладнання, оптимізації виробничих процесів і підвищення конкурентоспроможності продукції на ринку.

Ключові слова: вимірювання швидкості деформації, швидкісний режим, калібрування валків, основні діаметри, робочі валки, профілезгинальний стан, якість профілів, енергосилові витрати.

The study analyzed in detail the speed regime of forming bent profiles of the open type, focusing on the change in the peripheral velocities of the points of the axial section of the rolls depending on the ratio of their diameters and distances to the main diameter of the lower roll. It was found that the difference in the diameters of the rolls, in particular cases when the upper roll has a larger diameter than the lower one, significantly affects the speed regime of the process. At the same time, the displacement of the working groove to the lower roll, which is accompanied by bending the profile elements to the axis, leads to a decrease in the average profiling speed. This opens up prospects for a more detailed study of parameters such as the caliber height and the direction of bending, in order to optimize the speed regime. The speed regime is a decisive factor that affecting a number of characteristics of the process and the final product. In particular, the quality of the surface of the profiles, the level of wear of the rolls, energy consumption and the torque distribution between the rolls depend on it. Therefore, the correct selection of diameters and ratios of rolls, as well as the optimal location of calibers in the profile-making equipment are of paramount importance for ensuring a stable and high-quality final result. The study also included an analysis of the design and technological aspects of the speed regime, in particular the influence of friction, metal thinning and uniformity of roll rotation on the overall efficiency of the process. It was found that taking into account these factors contributes to the improvement of existing profiling technologies, reduces production losses and contributes to the creation of high-quality products. Thus, the results of the study are of practical importance for the modernization of equipment, optimization of production processes and increasing the competitiveness of products in the market.

Key words: deformation speed measurement, high-speed mode, calibration of rolls, main diameters, working rolls, profile condition, quality of profiles, energy consumption.

Вступ

У сучасних умовах забезпечення високої якості та надійності роботи промислових об'єктів різних галузей економіки стає особливо важливим. Це досягається через впровадження ефективних систем контролю на всіх етапах життєвого циклу: від виготовлення і введення в експлуатацію до обслуговування і відновлення. На кожному з цих етапів необхідно здійснювати контроль технічного стану об'єктів за допомогою методів неруйнівного контролю, технічної діагностики та періодичного моніторингу. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти дефекти, оцінювати стан обладнання та забезпечувати його безпечно і ефективно експлуатацію.

Останнім часом у зв'язку з інтенсифікацією виробництва гнутих профілів прокату при розробці та вдосконаленні процесів профілювання прагнуть посилювати режими формування, а для зменшення тертя застосовують високоефективні мастила [1-9]. Однак, якщо коефіцієнт тертя не перевищує певної мінімальної величини, смуга не захоплюється валками, і вони буксують по ній. В результаті збільшуються витрати енергії, відбувається перерозподіл зусиль формування між клітями, виникають додаткові динамічні навантаження на передавальні елементи приводу, погіршується якість профілів. Однак, скорочення додаткових витрат енергії, що досягається завдяки застосуванню дорогих високоякісних мастил, часто дає незначний економічний ефект, особливо при невеликому зменшенні коефіцієнта тертя. З урахуванням викладеного, кінематичний аналіз швидкісного режиму технологічного процесу профілювання є **важливим і актуальним** завданням.

Мета роботи – аналіз впливу швидкісного режиму профілювання на якість гнутих профілів.

Задачі роботи:

- 1) проаналізувати швидкісний режим технологічного процесу профілювання;
- 2) проаналізувати розподіл швидкостей у робочому калібрі валків.

Швидкісний режим технологічного процесу профілювання

При виробництві гнутих профілів швидкісний режим технологічного процесу істотно впливає на якість поверхні готових профілів, зношення робочих валків, енерговитрати, величини обертових моментів і розподіл їх між верхнім і нижнім валками. Для конструкції профілезгинальних станів промислового призначення, як правило, робочі валки виготовляють складовими (рис. 1), тобто складаються з робочого валу та укріплених на ньому профільних дискових елементів (шайб).

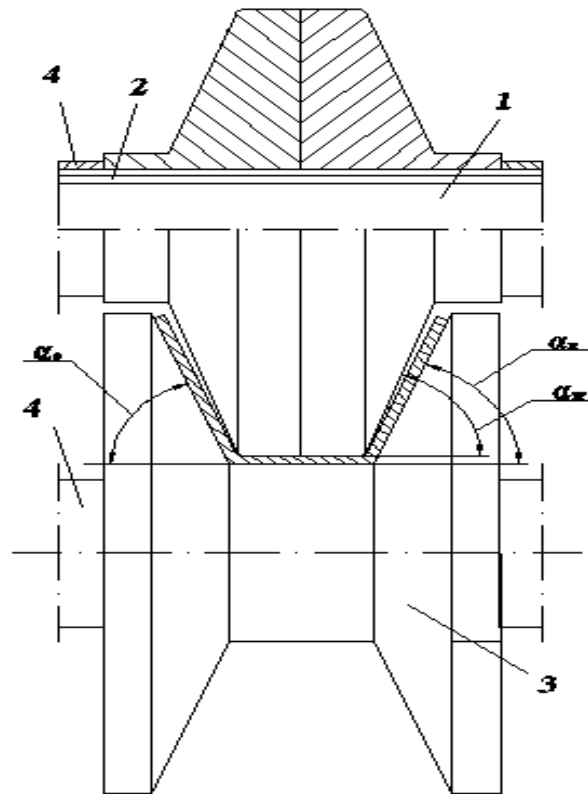


Рисунок 1 – Схема валків для формування швелера: 1 - робочий вал; 2 – шпонка; 3 – профільні дискові елементи; 4 – дистанційні дискові елементи

Такі валки найбільш зручні в експлуатації. Основні діаметри нижніх валків приймають мінімальних розмірів із забезпеченням умов міцності валу та профільних елементів валка.

При проектуванні стану основні діаметри верхніх валків визначаються для заданого сортаменту профілів, враховуючи

особливості розміщення у верхніх валках перехідних форм штаб, що профілюються, а також максимальної висоти врізу у валки. Отримані таким чином розміри діаметрів валків і їх співвідношення зазвичай залишають постійними незалежно від форми та розмірів профілю. Конструкція робочих ривчаків валків може передбачати виконання ділянок звільнення або бути без них, що безпосередньо впливає на ефективність і якість процесу профілювання.

У валках без ділянок звільнення ($a_n = a_b$) забезпечується рівномірний зазор по всій ширині ривчака в площині осьового перерізу валків. Така конструкція має певні переваги, з огляду на точність формування профілю, але зі збільшенням висоти формування смуги суттєво зростає відносно проковзування матеріалу у валках. Це призводить до значних енергетичних втрат на тертя, зниження якості поверхні профілю, а також до збільшення зносу валків. Через ці недоліки валки без ділянок звільнення обмежено застосовуються для формування профілів невеликої висоти або в разі необхідності виготовлення певних елементів перехідних форм профілю.

Виконання робочих ривчаків із ділянками (кутами) звільнення частково компенсує ці проблеми. Завдяки збільшенню проміжків у зонах із високим відносним проковзуванням між профільованою смугою та валками знижуються тертя і супутні енергетичні витрати, покращується якість поверхні профілю, а також зменшується знос робочих поверхонь валків. Така конструкція більш універсальна і дозволяє ефективно працювати з широким спектром профілів.

Нині оптимальний швидкісний режим профілювання вибирають за умовою рівності обертових швидкостей валків основних діаметрів. Цей підхід дозволяє зменшити відносно ковзання між металом і валками, що, своєю чергою, сприяє підвищенню якості формування профілю та зменшенню енергетичних втрат. Разом з

тим, для кожного конкретного випадку потрібно враховувати конструктивні особливості валків, параметри металу, що прокочується, та технологічні вимоги. Оптимізація цих параметрів дозволяє не лише знизити витрати, а й підвищити продуктивність виробничого процесу, забезпечуючи виготовлення продукції високої якості, яка відповідає сучасним стандартам і потребам ринку.

В даний час оптимальний швидкісний режим профілювання вибирають із умови рівності обертових швидкостей валків основних діаметрів:

$$i = \frac{D_{60}}{D_{нo}}, \quad (1)$$

де $D_{во}$ і $D_{но}$ - основні діаметри верхнього та нижнього валків відповідно.

Ця умова забезпечується передавальним відношенням у циліндричній парі шестеренного блоку, яке визначається при проектуванні та приймається рівним відношенню основних діаметрів робочих валків (рис. 2) відповідних клітей. Зазвичай це співвідношення приймають залежно від призначення стану (сортаменту профілів, що виготовляються). Для невеликих станів, що встановлюються на машинобудівних заводах, передавальне відношення часто приймають близьким одиниці. Для великих високопродуктивних станів, які встановлюються на металургійних підприємствах для масового виробництва гнутих профілів, співвідношення між основними діаметрами приймають більшим, що забезпечує:

- полегшення комплектів валків;
- створення компактної конструкції стану.

Для профілезгинальних агрегатів, встановлених на металургійних підприємствах, співвідношення між основними діаметрами становить:

- а) $i=2,2$ (для станів 1...4x400...1500);
- б) $i=2,333$ (для станів 2...7x80...500);
- в) $i=2,48$ (для станів 2...6x100...600);
- г) $i=2,5$ (для станів 1...4x50...300);
- д) $i=1,0$ (для станів 0,5...2,5x600...1500).

При розробці калібрування валків необхідно забезпечити середню обертову швидкість на кожній наступній парі валків не меншу, ніж на попередній. Оскільки на практиці складно забезпечити точний розрахунок середньої обертової швидкості кожної пари валків, збільшення обертових швидкостей у кожній наступній парі валків виробляють послідовним збільшенням їх основних діаметрів [1]:

- для виробництва профілів невеликих поперечних перерізів із заготовок завтовшки 0,3...2,5 мм збільшують на 0,4%;
- для великих профілів збільшують на 0,1...0,4%;
- для смуг, вужчих 0,3 мм, збільшують на 0,25%.

Швидкісний режим профілювання в кожній парі валків (для загального випадку $D_{во} > D_{но}$), характеризується абсолютними та відносними швидкостями окремих точок контакту смуги та валків. Обертові швидкості різних точок валків залежать від кутових швидкостей та відстані цих точок до осі обертання.

Оскільки кутові швидкості суміжних валків однієї кліти жорстко взаємопов'язані через механізми кліток, аналогічно взаємопов'язані й абсолютні та відносні швидкості точок на поверхнях валків. Ця залежність визначає розподіл швидкостей у робочому калібрі валків, який використовується для формування гнутих профілів.

Розподіл швидкостей у робочому калібрі валків, що призначений для профілювання гнутих профілів

Для аналізу розподілу обертових швидкостей у калібрі приймається рівність обертових швидкостей у точках основних діаметрів верхнього та нижнього валків. Позначивши величини цих швидкостей через v_0 , було побудовано графіки розподілу обертових швидкостей. Як показують графіки (див. рис. 2), обертові швидкості точок нижнього валка збільшуються в стільки разів, у скільки разів його основний діаметр менший за основний діаметр верхнього валка. Ця залежність є важливим фактором при

проектуванні калібрів і виборі швидкісного режиму профілювання, оскільки впливає на якість процесу та розподіл навантаження між валками.

Встановлено, що розподіл швидкостей у калібрі не лише визначається геометрією валків, але й суттєво залежить від властивостей металу, тертя між валками та матеріалом профілю, а також технологічних параметрів процесу.

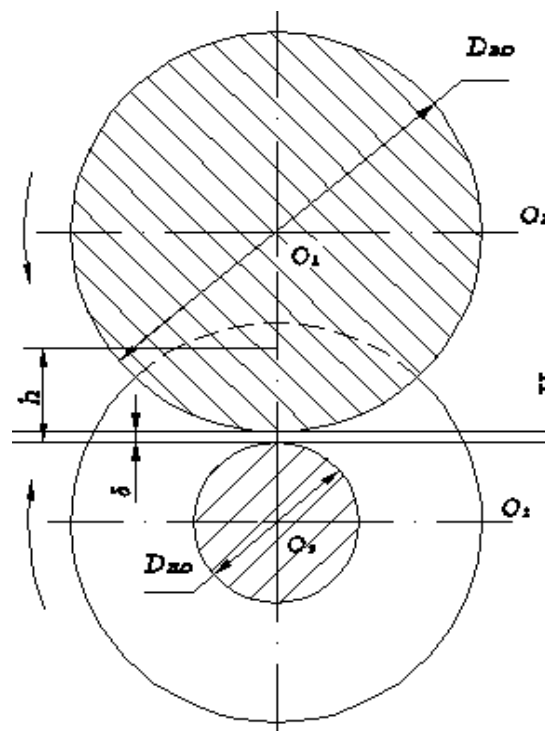


Рисунок 2 – Схема до аналізу розподілу швидкостей в осьовому перерізі валків

Нерівномірність швидкостей, яка виникає через різницю діаметрів верхнього і нижнього валків, може спричинити проковзування металу в калібрі, підвищене тертя і зношування валків, що негативно впливає на якість профілю та енергетичну ефективність процесу.

Тому для забезпечення рівномірного розподілу швидкостей і мінімізації проковзування металу у калібрі важливо враховувати співвідношення діаметрів валків, кутові швидкості обертання, тертя і конструктивні особливості робочих рівчаків. Крім того, слід застосовувати методи математичного моделювання для оптимізації швидкісного режиму, що дозволить забезпечити стабільність

процесу профілювання та отримати вироби з високими якісними характеристиками.

З аналізу графіка випливає, що обертові швидкості верхнього та нижнього валків тільки в одній точці А будуть рівними. Положення точки А за висотою визначається з подібності трикутників O_1AB та O_2AB :

$$O_2A = \left(\frac{D_{н.о}}{2} \right) + \left[\frac{\delta}{(i+1)} \right], \quad (2)$$

де: δ – зазор між валками; i – відношення основних діаметрів валків.

Зміни обертових швидкостей протилежних точок осевого перерізу валків залежно від співвідношення основних діаметрів та їх відстаней від основного діаметра нижнього валка визначаються такими залежностями:

$$v_H = v_0 \left[1 + \left(\frac{2h}{D_{н.о}} \right) \right]. \quad (3)$$

З рівнянь (3) випливає, що зі збільшенням висоти h швидкості протилежних точок верхнього валка зменшуються, а нижнього – зростають. При цьому середня швидкість у точках осевого перерізу валків визначається за залежністю:

$$v_{CP} = \frac{1}{2}(v_B + v_H) = v_0 \left[1 + \frac{h(i-1) + \delta}{iD_{н.о}} \right]. \quad (4)$$

Для спрощення приймаємо:

- зазор між валками однаковий по всьому периметру калібру;
- зчеплення смуги, що формується з валками, однакове у всіх точках контакту.

З аналізу формули (4) випливає, що зі збільшенням h середня швидкість (v_{CP}) протилежних точок за висотою верхнього та нижнього валків зростає (рис. 2). Отже, зростає також швидкість заготовки, що профілюється. При $i=1$ середня швидкість залежить від h , оскільки:

$$v_{CP} = v_0 \left(1 + \frac{\delta}{D_{н.о}} \right). \quad (5)$$

Таким чином, у кожній точці осевого перерізу робочого калібру валки прагнуть переміщувати метал, що профілюється, зі швидкістю більшою, ніж обертова швидкість у місцях основних діаметрів.

Розміщення робочого калібру в нижньому валку з підгинанням елементів профілю від рівня основного діаметра до осі призводить до зменшення v_{CP} , оскільки величина h у своїй матиме відповідне значення. Тому при розробці калібрування валків для створення необхідного швидкісного режиму, слід враховувати вплив величини h , тобто напрямок підгинання елементів профілю.

Швидкість руху смуги, що профілюється, визначається сумарним впливом на неї верхнього та нижнього валків у місцях контакту. На вході заготовка (рис. 3) захоплюється валками у місці перетину їх максимальних діаметрів (точка А) та, переміщаючись, формується (товщиною металю можна знехтувати). При цьому переміщення окремих її елементів відбувається за складною траєкторією.

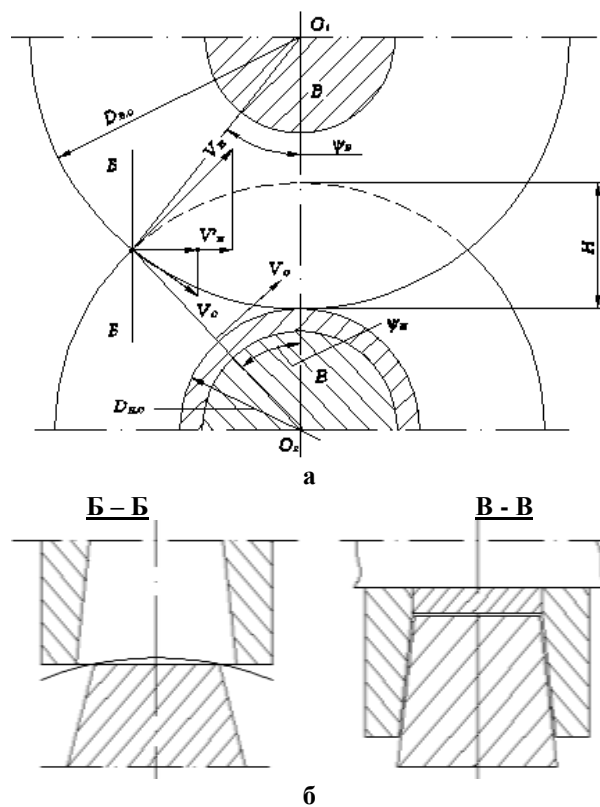


Рисунок 3 – Схеми: а – діючих швидкостей; б – місце контакту смуги з валками

Горизонтальна складова швидкості валків у точці А буде характеризувати швидкість руху заготовки. Її величина залежить від діаметрів валків (співвідношення діаметрів, висоти калібру, кутових швидкостей) і складає:

- для верхнього валка:

$$v'_B = v_0 \cos \psi_B \quad (6)$$

- для нижнього валка:

$$v'_H = v_0 \left(1 + \frac{2H}{D_{HO}} \right) \cos \psi_H, \quad (7)$$

де: H – глибина рівчака.

Значення $\cos P_B$ та $\cos P_H$ визначаються із рівнянь, що складені відповідно до схеми, наведеної на рис. 3:

$$\left(\frac{D_{HO}}{2} + H \right) \cos \psi_H + i \frac{D_{HO}}{2} \cos \psi_B = \quad (8)$$

$$= \frac{D_{HO}}{2} (i+1),$$

$$\frac{iD_{HO}}{2 \sin \psi_H} = \frac{D_{HO} + 2H}{2 \sin \psi_B}, \quad (9)$$

Розв'язуючи спільно рівняння (8) та (9), отримуємо:

$$\cos \psi_B = \frac{D_{HO}^2 (2i^2 - 2i + 1) - (D_{HO} + 2H)^2}{2iD_{HO}^2 (i+1)} \quad (10)$$

$$\cos \psi_H = \frac{D_{HO}^2 (2i \mp 1) + (D_{HO} + 2H)^2}{2D_{HO}^2 (D_{HO} + 2H)(i+1)}; \quad (11)$$

Після підстановки значень $\cos P_B$ та $\cos P_H$ у формули (6) та (7) отримуємо горизонтальні складові швидкостей:

$$v'_B = v_0 \left[1 - \frac{2H(D_{HO} - H)}{iD_{HO}^2 (1+i)} \right]; \quad (12)$$

$$v'_H = v_0 \left[1 + \frac{2H(D_{HO} + H)}{D_{HO}^2 (1+i)} \right]. \quad (13)$$

З формул (12) і (13) випливає, що горизонтальна складова швидкості нижнього валка буде більшою за

відповідну складову швидкості верхнього валка.

Якщо горизонтальна складова швидкості профілю у валках дорівнюватиме обертовій швидкості в місцях основних діаметрів валків, то горизонтальна складова швидкості верхнього валка є меншою швидкості смуги, що профілюється, а нижнього валка (v'_B) є більшою, тобто:

$$v'_B < v_{нол} < v'_H. \quad (14)$$

Горизонтальні складові відносних швидкостей валків та профілю в момент її входу в робочий калібр становлять:

а) для верхнього валка:

$$v'_B - v_0 = -v_0 \frac{2H(D_{HO} - H)}{iD_{HO}^2 (i+1)}; \quad (15)$$

б) для нижнього валка:

$$v'_H - v_0 = v_0 \frac{2H(D_{HO} + H)}{D_{HO}^2 (i+1)}. \quad (16)$$

Як впливає з отриманих формул, у процесі профілювання верхній валок перешкоджатиме руху профілю зі швидкістю, що відповідає обертовій швидкості у місцях основних діаметрів валків. Нижній валок буде збільшувати швидкість руху профілю.

Відносна швидкість випередження нижнього валка буде завжди більшою від відносної швидкості відставання верхнього валка на величину, яка розраховується за формулою:

$$(v'_H - v_0) - (v'_B - v_0) = \frac{v_0 H}{i} \left(\frac{i-1}{i+1} + \frac{H}{D_{HO}} \right). \quad (17)$$

Як видно з формули (17), різницю між відносними швидкостями випередження профілю нижнім валком і відставання профілю від верхнього валка в точці А завжди буде додатною та, сприяючи збільшенню швидкості смуги, зростатиме зі збільшенням глибини рівчака за інших рівних умов.

При розгляді процесу профілювання гнутих профілів у точках контакту смуги з валками, розташованими між точкою А і осьовим перерізом валків (рис. 3),

виявлено низку важливих закономірностей. Заготовка переважно контактує з верхнім валком у зонах основного діаметра та прилеглих до нього заокруглень, тоді як з нижнім валком взаємодія відбувається по похилих стінках рівчака. Ця специфіка контакту суттєво впливає на розподіл швидкостей і тиску в робочому калібрі.

Швидкісні характеристики контакту:

- Верхній валок: Швидкість точок контакту на верхньому валку відрізняється від швидкості смуги як за величиною, так і за напрямком. У цих зонах спостерігається гальмівна дія валка на заготовку, що пояснюється різницею лінійних швидкостей поверхні валка та смуги.

- Нижній валок: Швидкість точок контакту нижнього валка значно перевищує швидкість руху смуги. Горизонтальні складові швидкостей у кожному перерізі нижнього валка мають вищі значення, ніж швидкість заготовки, що сприяє її прискоренню.

Розподіл тиску та сил зчеплення: Максимальні питомі тиски та сили зчеплення валків із заготовкою концентруються поблизу осьового перерізу Б–Б (рис. 3), особливо в зонах формування радіусів і мінімальних зазорів між валками. У міру віддалення від цієї зони вплив валків на смугу поступово зменшується. Застосування конструктивних рішень, таких як кути і ділянки звільнення, дозволяє знизити сили тертя в критичних ділянках, оптимізуючи швидкісний режим і зменшуючи енергетичні втрати.

Вплив конструктивних особливостей:

- Використання кутів звільнення в робочих рівчаках (наприклад, при формуванні швелерів) дозволяє зосередити основні зусилля в точках контакту з основними діаметрами верхнього і нижнього валків, а також у місцях переходу до бокових поверхонь. Це сприяє більш ефективному профілюванню та знижує негативний вплив тертя.

- При відношенні основних діаметрів верхнього і нижнього валків більше одиниці швидкість руху смуги між клітями

зростає через поступове зміщення контактних ділянок нижніх валків догори.

Практичне застосування: Теоретичні висновки підтверджені практикою профілювання [1, 3, 4, 5]. Зокрема, при виготовленні складних профілів, таких як кутик, швелер, коритний або напівкруглий профіль, можна забезпечити необхідний натяг смуги за допомогою правильного калібрування валків. Це дозволяє уникнути послідовного збільшення основних діаметрів, яке зазвичай призводить до підвищених енергетичних витрат, погіршення якості поверхні профілю та підвищеного зносу валків.

Таким чином, теоретичний аналіз розподілу швидкостей у калібрі валків при виготовленні сортових профілів (кутика, швелера, коритного, напівкруглого та ін.) показує, що в процесі профілювання:

- верхній валок перешкоджає руху смуги зі швидкістю, що дорівнює лінійній швидкості по колах основних діаметрів;

- нижній валок збільшує швидкість руху смуги.

Різниця між відносними швидкостями випередження профілю нижнім валком і відставання верхнього валка від профілю при даній схемі профілювання завжди додатна і сприяє збільшенню швидкості переміщення профілю калібру. При цьому між верхнім валком і профілем створюється зусилля T_t , що гальмує профіль. Це зусилля залежить від величини та характеру розподілу питомих тисків металу на валок, площі контакту профілю та валка, різниці лінійних швидкостей профілю та валка у місцях контакту.

При відключенні верхнього валка між ним та профілем створюється зусилля T_x , що обертає верхній валок. Це зусилля залежить від маси валка та коефіцієнта тертя у його підшипниках. Отже, при $T_x < T_t$ вимкнення верхнього валка призведе до зменшення витрати енергії на профілювання та покращення якості готового профілю.

На невеликих станах для узгодження швидкостей руху профілю в послідовно розташованих клітях вріз калібру

передбачається, як у верхні, так і у нижні валки. При неправильно вибраних розмірах валків двох сусідніх клітей швидкість виходу заготовки з будь-якої попередньої клітей може виявитися більшою за швидкість руху заготовки в наступній клітей. У цьому випадку перед валками утворюється петля, що викликає пробуксування та злам смуги. При надмірному натягу між клітей має місце передчасне і нерівномірне зношування валків і передавальних механізмів, підвищена витрата енергії, а на поверхні профілю утворюються задири.

Травлений метал і нержавіючі сталі слід профілювати з меншою швидкістю, застосовувати мастила, підбирати відповідний матеріал валків, тому що при великих швидкостях можливе утворення задири на поверхні профілів та налипання металу на валки.

Нікелеві сплави профілюються складніше, ніж нержавіюча сталь. Тому вони повинні формуватися з застосуванням менших швидкостей, ніж нержавіюча сталь.

При безперервному процесі профілювання у стані швидкість заготівлі $v_{заг}$ постійна. Вочевидь, що у калібрі валків є точки, у яких обертові швидкості валка і заготівлі рівні, тобто:

$$v_{заг} = \omega_B \frac{D_{кв}}{2} = \omega_H \frac{D_{кн}}{2}, \quad (18)$$

де: $D_{кв}$ та $D_{кн}$ - катаючі діаметри верхнього та нижнього валків, відповідно.

Коефіцієнти тертя, що забезпечують мінімальні енергетичні витрати процесу профілювання гнутих профілів

Коефіцієнт тертя, при якому валки не буксують по смугі, можна визначити з умови врівноваження сил, що діють у калібрі, тобто з умови, що сума проєкцій на горизонтальну площину сил, що діють у вертикальних площинах з боку конічних елементів нижнього валка, дорівнює сумі сил, що діють на циліндричних елементах верхнього та нижнього валків (рис. 1):

$$2(T_1 \cos \beta - P_{KZ}) = T_{цв} + T_{цн}. \quad (19)$$

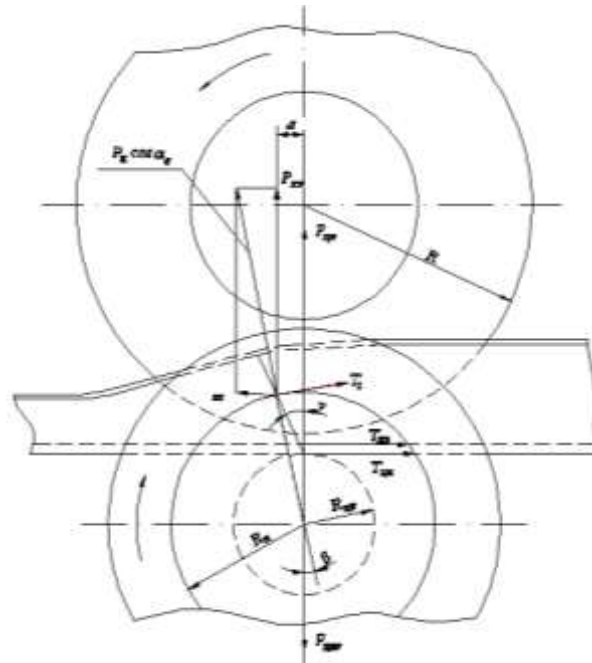


Рисунок 4 – Схема сил, що діють на смугу у вертикальній площині

Відповідно до [9]:

$$\begin{aligned} T_1 &= f_k P_k \cos \gamma; \\ P_{KZ} &= P_k \cos \alpha_c \sin \beta; \\ T_{цв} &= f_{цв} \cdot P; \\ T_{цн} &= f_{цн} \cdot P_{цн}, \end{aligned}$$

де: T_1 – складова сили тертя від ковзання конічного елемента по полиці; P_{KZ} – сила, що виштовхує смугу з калібру; $T_{цв}$ і $T_{цн}$ – сили тертя на циліндричних елементах верхнього та нижнього валків, відповідно; $f_k, f_{цв}, f_{цн}$ – коефіцієнти тертя на конічних та циліндричних елементах верхнього та нижнього валків, відповідно; P_k – рівнодіюча сила тиску на конічному профільному елементі; P – сумарний тиск металу на валки; $P_{цн}$ – зусилля, що діє з боку циліндричного елемента нижнього валка; α_c – сумарний кут підгинання; γ – кут відхилення ділянки контакту полиці з конічним елементом від осьової площини валків; β – кут відхилення напрямку сили P_k від осьової площини валків.

Кут β пов'язаний з кутом α_c залежністю:

$$\beta = 2 \arcsin \frac{x_{цн} \sin \gamma}{2R_k}, \quad (20)$$

де: $x_{цн}$ – координата точки прикладання сили P_k ; R_k – радіус конічного елемента валка в перерізі, що проходить через точку прикладання сили P_k .

За відсутності пробуксовування [10]: $f_{цв} \approx f_{цн}$.

Тоді вираз (1) набуває вигляд:

$$\begin{aligned} 2(f_k P_k \cos \gamma \cos \beta - P_k \cos \alpha_c \sin \beta) = \\ = f_{цн} (P + P_{цн}). \end{aligned} \quad (20)$$

Звідси

$$f_{цн} = \frac{2P_k (f_k \cos \gamma \cos \beta - \cos \alpha_c \sin \beta)}{P + P_{цн}}, \quad (21)$$

Щоб сили, які діють у напрямку профілювання, були активними, має виконуватися умова:

$$\begin{aligned} f_{цн} (P + P_{цн}) + 2f_k P_k \cos \gamma \cos \beta = \\ = 2P_k \cos \alpha_c \sin \beta, \end{aligned} \quad (22)$$

Підставивши (21) до (22), отримаємо значення коефіцієнта тертя f'_k :

$$f'_k = \frac{\cos \alpha_c \sin \beta}{\cos \gamma \cos \beta} = \frac{\cos \alpha_c \operatorname{tg} \beta}{\cos \gamma}. \quad (23)$$

Аналогічний вираз знаходиться з умови рівності нулю суми проекції на вісь z сил, що діють на конічних елементах нижнього валка.

Аналіз виразу (23) показує що f'_k залежить від сумарного кута підгинання α_c та кута γ , який, у свою чергу, залежить від режиму формування та геометричних параметрів профілю.

Формула (23) справедлива для сумарних кутів підгинання $\alpha_c \neq 90^\circ$. При $\alpha_c = 90^\circ$ картина дії сил калібру значно змінюється.

Виконано розрахунок коефіцієнта тертя f'_k , виходячи з експериментальних даних, отриманих у роботі.

У випадку формування швелера 80x80x3мм з смугової сталі Ст.3 кп до $\alpha_c = 44^\circ$ при куті підгинання за прохід: $\alpha_n = 11^\circ$, $\gamma = 18^\circ$, $\beta = 4^\circ 56'$.

а) без змащування $P = 1670$ кГ, $P_k = 980$ кГ, $P_{цн} = 980$ кГ, $f_k = 0,25$, $f_{цн} = f_{цв} = 0,052$;

б) зі змащуванням індустриальним мастилом СУ $P = 1600$ кГ, $P_k = 445$ кГ, $P_{цн} = 980$ кГ, $f_k = 0,15$, $f_{цн} = f_{цв} \approx 0,03$.

При підстановці у формулу (3) значень P , P_k , $P_{цн}$, наведених вище, отримано:

а) без мастила $f_{цн} = 0,06$;

б) зі змащенням $f_{цн} = 0,029$.

Відхилення розрахункових значень від експериментальних не перевищує 13,5%.

При підстановці формулу (56) значень $\cos \alpha_c$, $\operatorname{tg} \beta$, $\cos \gamma$ отримано $f'_k = 0,061$.

Таким чином, величина f_k виявилась приблизно в 4 рази меншою, ніж величина f'_k при профілюванні без мастила.

Визначений експериментально коефіцієнт тертя ($f \approx 0,06$), при якому відбувалося пробуксовування валків по смузі, відповідає залежності $f = f'_k$.

З наведених даних випливає, що коефіцієнт тертя можна зменшувати за допомогою високоякісних мастил приблизно в 3...4 рази у порівнянні з профілюванням без змащення. З використанням звичайних технологічних мастил він зменшується в 1,5...2 рази.

При розробці технології профілювання для забезпечення нормального (без пробуксовування) технологічного процесу необхідно (відповідно до обраного калібрування) визначити коефіцієнти тертя (f'_k) для кожної кліти та підібрати таке мастило, яке б забезпечувало максимальний з них (або дещо більший). Якщо необхідне мастило відсутнє, слід відкоригувати калібрування за рахунок зміни кута підгинання.

Коефіцієнт тертя, що забезпечує отримання якісних гнутих профілів

У роботі [11] встановлено, що під дією сил тертя в місцях контакту профільованого металу з валками виникають нормальні напруження, що розтягують σ_{zz} , які локалізуються в тонкому поверхневому шарі та можуть призвести до його руйнування.

Максимальні розтягувальні напруження на поверхні контакту визначаються виразом:

$$\sigma_{zz}^{\max} = 3,6f\sigma_s, \quad (24)$$

де: f – коефіцієнт тертя; σ_s – межа плинності металу смуги.

При формуванні сталевих профілів без спеціальних покриттів для отримання якісної поверхні має виконуватися умова

$$\sigma_{zz}^{\max} < \sigma_s.$$

З графіка (рис. 5, а) випливає, що ця умова виконується за $f \leq 0,275$. Разом з тим, в результаті впливу зовнішнього середовища поверхневий шар має знижені властивості міцності порівняно з основним металом. Крім того, у прямолінійних елементах, що підгинаються, в результаті формозмінення виникають розтягувальні напруження, які можуть досягати межі плинності. Тому, щоб запобігти руйнуванню поверхневого шару, необхідний у 1,8...2,5 рази більший запас міцності, що забезпечується при коефіцієнті тертя $f=0,1$. При профілюванні смуг з покриттям з іншого металу, що зберігає основний метал від корозії, важливо зберегти це покриття від руйнування в процесі формозмінення. Товщина покриття незначна. Так, на листи з алюмінієвих сплавів на обидві поверхні наноситься шар чистого алюмінію, товщина якого становить 2...4% від товщини листа. Він менш міцний, ніж основний метал ($\sigma_s=3...6$ кг/мм² і $\sigma_s=10...20$ кг/мм², $\sigma_b=9...12$ кг/мм², $\sigma_b=20...32$ кг/мм², відповідно), показники пластичності в нього у 1,5...2,5 рази вищі. $\sigma_T=9...12$ кг/мм²); 1 – ($\sigma_s=15$ кг/мм²; 2 – ($\sigma_s=13$ кг/мм²).

Для збереження покриття на поверхні контакту має виконуватися умова:

$$\sigma_{zz}^{\max} < \sigma_{\text{ВПЛ}}.$$

Визначимо коефіцієнт тертя, у якому забезпечується ця умова, для алюмінієвого металу АМг5М з $\sigma_s=13...15$ кг/мм².

З рис. 2, б видно, що при 0,18 напруги перевищують межу міцності покриття, що плакує. Для збереження міцності

плакуючого покриття коефіцієнт тертя повинен бути меншим за 0,18 ($f \geq \sigma_{zz}^{\max}$).

Експериментальні дослідження та практика профілювання підтверджують, що використання мастил, які забезпечують коефіцієнт тертя $f=0,1...0,16$ при формуванні профілів без металевого покриття та $f=0,09...0,14$ з покриттям, дозволяє отримувати профілі практично без поверхневих дефектів, що викликаються дією сил тертя, тобто гарантується достатній запас міцності.

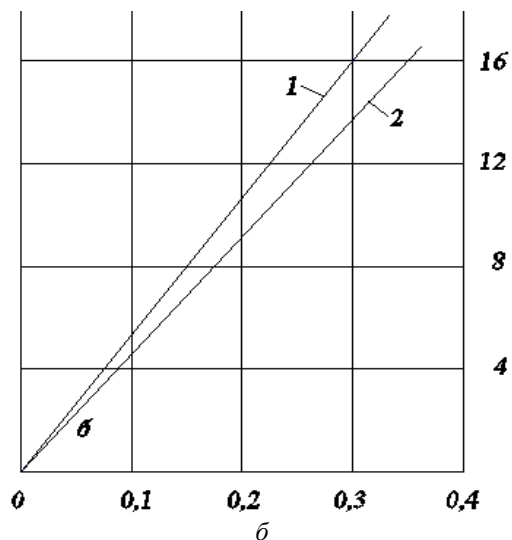
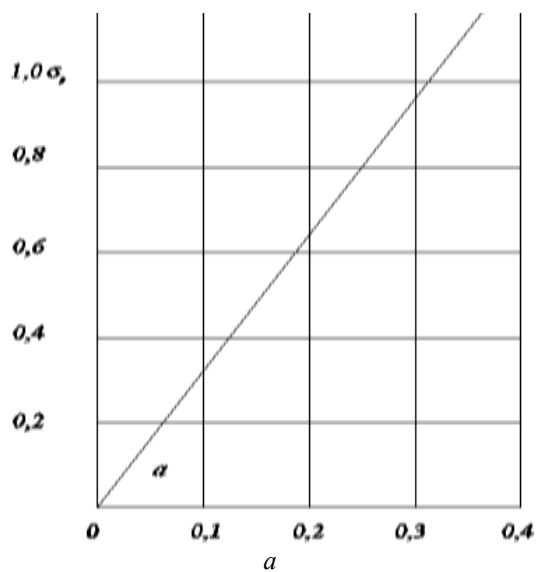


Рисунок 5 – Залежність максимального напруження (σ_{zz}^{\max}) від коефіцієнта тертя для смуг алюмінієвого сплаву АМг6М з плакуючим покриттям (чистий алюміній)

Величину коефіцієнта тертя $0,1...0,14$ при обробці робочих поверхонь профільних валків Ra $0,63...0,32$ забезпечують наступні мастильно-охолоджуючі емульсії:

1) для сталевих профілів без покриття: 5% емульсія на стандартному емульсолі (Е-1);

2) для оцинкованих профілів: 5% емульсія на основі полімеризованої бавовняної олії.

При формуванні профілів із металевим плакуючим покриттям, а також профілів з матеріалів, схильних до налипання на інструмент (нержавіючих сталей), рекомендуються наступні мастила: 1) полімеризована бавовняна олія ($f=0,08...0,1$); 2) циліндричне масло № 24 «Віскозин» ($f=0,1...0,12$); 3) 5% емульсія на основі пасти СП-3 ($f\approx 0,1$); 4) солідол із добавкою дисульфиду молібдену ($f=0,1$).

Висновки

Проведено аналіз технологічних елементів процесу формозміни при валковому формоутворенні, які спрямовані на визначення метрологічних підходів до оцінки стану процесу валкового формоутворення листового металу. Коефіцієнт тертя, при якому валки не буксують по смузі, можна визначити з умови врівноваження сил, що діють у калібрі, тобто з умови, що сума проєкцій на горизонтальну площину сил, що діють у вертикальних площинах з боку конічних елементів нижнього валка, дорівнює сумі сил, що діють на циліндричних елементах верхнього та нижнього валків. Проведено експериментальні та модельні дослідження, спрямовані на дослідження впливу тертя на швидкісні характеристики процесу формозміни. Визначений експериментально коефіцієнт тертя ($f\approx 0,06$), при якому відбувалося пробуксовування валків по смузі, відповідає залежності $f = f'_k$. Виконано аналіз даних щодо процесу валкового формоутворення листового металу. З отриманих даних випливає, що коефіцієнт тертя можна зменшувати за допомогою високоякісних мастил приблизно в 3...4

рази порівняно з профілюванням без змащення. З використанням звичайних технологічних мастил він зменшується у 1,5...2 рази. При розробці технології профілювання для забезпечення нормального (без пробуксовування) технологічного процесу необхідно (відповідно до обраного калібрування) визначити коефіцієнти тертя (f'_k) для кожної кліті та підібрати таке мастило, яке б забезпечувало максимальний з них (або дещо більший). Якщо необхідне мастило відсутнє, слід відкоригувати калібрування за рахунок зміни кутів підгинання. Таким чином, можливим стає визначення технологічних засад метрологічного забезпечення процесу формоутворення листового металу.

Список використаних джерел

1. Закалов О.В. Триботехніка і підвищення надійності машин. Тернопіль: ТДТУ, 2000. 354 с.
2. Кузьменко А.Г. Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність: навчальний посібник. Хмельницький: ГУП, 2002. 151 с.
3. Кузьменко А.Г., Диха О.В. Дослідження зносоконтатної взаємодії змащених поверхонь тертя: монографія. Хмельницький: ХНУ, 2005. 184 с.
4. Кондрачук М.В., Хабутель В.Ф., Пашечко М.І, Корбут Є.В. Трибологія. Київ: «НАУ-друк», 2009. 232 с.
5. Диха О.В., Сорокати Р.В., Бабак О.П. Розрахунки та випробування на надійність машин і конструкцій: навчальний посібник. Хмельницький: ХНУ, 2011. 151 с.
6. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навчальний посібник. Тернопіль: «ТНТУ ім. І. Пулюя», 2011. 322 с.
7. Диха О.В. Вузли тертя машин. Розрахунки на зносостійкість: навчальний посібник. Хмельницький: ХНУ, 2013. 147 с.

8. Рymar O.M. Вплив тертя на концентрацію напружень та міцність деталей машин. Львів: Сполон, 2022. 378 с.

9. Новицький A.B., Ружило З.В., Банний O.O., Бистрий O.M., Сиволапов В.А. Надійність машин та обладнання. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання. Київ: НУБІПУ, 2023. 209 с.

INFLUENCE OF HIGH-SPEED PROFILING MODE ON THE QUALITY OF ROLLED SHAPES

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

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; 2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine;
 e-mail: serhii.pliesnetsov@khp.edu.ua

References

1. Zakalov O.V. Trybotekhnika i pidvyshchennia nadiinosti mashyn. Ternopil: TDTU, 2000. 354 p. [in Ukrainian]

2. Kuzmenko A.H. Metody rozrakhunkiv i vyprobuvan na znoshuvannia ta nadiinist: navchalnyi posibnyk. Khmelnytskyi: TUP, 2002. 151 p. [in Ukrainian]

3. Kuzmenko A.H., Dykha O.V. Doslidzhennia znosokontaknoi vzaiemodii zماشchenykh poverkhon tertia: monohrafiia. Khmelnytskyi: KhNU, 2005. 184 p. [in Ukrainian]

4. Kondrachuk M.V., Khabutel V.F., Pashechko M.I., Korbut Ye.V. Trybolohiia. Kyiv: «NAU-druk», 2009. 232 p. [in Ukrainian]

5. Dykha O.V., Sorokatyi R.V., Babak O.P. Rozrakhunky ta vyprobuvannia na nadiinist mashyn i konstruktsii: navchalnyi posibnyk. Khmelnytskyi: KhNU, 2011. 151 p. [in Ukrainian]

6. Zakalov O.V., Zakalov I.O. Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh: navchalnyi posibnyk. Ternopil: «TNTU im. I. Puliuia», 2011. 322 p. [in Ukrainian]

7. Dykha O.V. Vuzly tertia mashyn. Rozrakhunky na znosostiikist: navchalnyi posibnyk. Khmelnytskyi: KhNU, 2013. 147 p. [in Ukrainian]

8. Rymar O.M. Vplyv tertia na kontsentratsiiu napruzhen ta mitsnist detalei mashyn. Lviv: Spolom, 2022. 378 p. [in Ukrainian]

9. Novytskyi A.V., Ruzhylo Z.V., Bannyi O.O., Bystryi O.M., Syvolapov V.A. Nadiinist mashyn ta obladnannia. Otsinka ta zabezpechennia nadiinosti mashyn ta obladnannia. Kyiv: NUBIPU, 2023. 209 p. [in Ukrainian]

АВТОМАТИЗАЦІЯ І КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ КОМПЛЕКСИ

УДК 681.5

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-53-65

ЗАДАЧІ СТВОРЕННЯ ТА КРИТЕРІЇ УПРАВЛІННЯ БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО КАТЕРА ДЛЯ ПРИРОДООХОРОННИХ МІСІЙ НА МІЛКОВОДНИХ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЯХ

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, splashbox98@gmail.com*

Задачі створення безекіпажного надводного катера як об'єкта керування сформульовано та обґрунтовано з позицій зовнішнього і внутрішнього проектування. Зовнішнє проектування містить задачі, які забезпечують відповідність катера експлуатаційним вимогам, а внутрішнє проектування містить задачі його проектування як інженерного автоматично керованого об'єкта. До головних задач зовнішнього проектування віднесено множину природоохоронних задач, які має розв'язувати безекіпажний надводний катер як агент берегового центру керування, та множину загальних експлуатаційних характеристик майбутнього катера як об'єкта автоматичного керування. Показано, що обґрунтування технічних характеристик катера та обґрунтування переліку і технічних характеристик його приладового та інструментального обладнання утворює окрему прикладну наукову задачу. Її розв'язок пропонується на основі застосування системного підходу, який передбачає врахування взаємного впливу усіх значущих складових новостворюваного катера на його архітектурно-конструктивний тип, енергетичне та інформаційне забезпечення, рівень автоматизації та комунікаційні можливості як морського робота, а також передбачає врахування низки експлуатаційних характеристик катера. У результаті отримано послідовність операцій конструктора-системотехніка щодо проектування безекіпажного надводного катера, яка утворює інформаційну базу для формування переліку природоохоронного обладнання катера. До результатів зовнішнього проектування катера також віднесено розроблений повний перелік обладнання, призначеного для виконання природоохоронних задач, та генеральна множина основних робіт, направлених на розв'язок задач зі створення катера. До головних задач внутрішнього проектування віднесено генеральну множину основних робіт, направлених на розв'язок задач з інженерного проектування катера, яка містить етапи дослідницького, ескізного, технічного і робочого проектування катера. В основу процесу внутрішнього проектування покладено системний підхід, який передбачає врахування взаємного впливу усіх значущих складових новостворюваного інноваційного технічного об'єкта, що проектується. У результаті запропоновано «рівняння існування» безекіпажного надводного катера за чотирма групами критеріїв: мас і об'ємів катера, енергетичного балансу та балансу інформаційних потоків катера, а також комплексного критерію ефективності застосування катера за призначенням. Результати досліджень утворюють інформаційне підґрунтя для створення безекіпажного природоохоронного катера як об'єкта керування, що призначений для досліджень внутрішніх водойм та приморських акваторій держави.

Ключові слова: безекіпажний природоохоронний катер, автоматичне керування, системний підхід, рівняння існування, генеральна множина робіт.

The tasks of creating an unmanned surface boat as a control object are formulated and substantiated from the standpoint of external and internal design. External design includes tasks that ensure the boat's compliance with operational requirements, and internal design includes tasks of designing it as an engineering automatically controlled object. The main tasks of external design include a set of environmental protection tasks to be solved by an unmanned surface boat as an agent of the coastal control center, and a set of general operational characteristics of the future boat as an object of automatic control. It is shown that the justification of the technical characteristics of the boat and the justification of the list and technical characteristics of its instrumentation and instrumental equipment constitute a separate applied scientific problem. Its solution is proposed based on the use of a systems

approach, which involves taking into account the mutual influence of all significant components of the newly created boat on its architectural and structural type, energy and information support, level of automation and communication capabilities as a marine robot, and also involves taking into account a number of operational characteristics of the boat. As a result, a sequence of operations of the designer-system engineer for the design of an unmanned surface boat was obtained, which forms an information base for forming a list of environmental equipment of the boat. The results of the external design of the boat also include the developed full list of equipment intended for performing environmental tasks, and a general set of main works aimed at solving the problems of creating the boat. The main tasks of internal design include a general set of main works aimed at solving the problems of engineering design of the boat, which includes the stages of research, sketch, technical and working design of the boat. The main tasks of internal design include a general set of basic works aimed at solving problems in the engineering design of the boat, which includes the stages of research, sketch, technical and working design of the boat. The basis of the internal design process is a systematic approach that involves taking into account the mutual influence of all significant components of the newly created innovative technical object being designed. As a result, an “existence equation” of an unmanned surface boat was proposed according to four groups of criteria: the mass and volume of the boat, the energy balance and the balance of information flows of the boat, as well as a complex criterion for the effectiveness of the use of the boat for its intended purpose. The research results form an information basis for the creation of an unmanned environmental protection boat as a control object, intended for research of inland water bodies and coastal water areas of the state.

Keywords: unmanned environmental protection boat, automatic control, systems approach, existence equation, general set of works.

Вступ

Безекіпажні надводні судна (БНС, в англomовній літературі – Unmanned Surface Vehicles – USVs або Maritime Autonomous Surface Ships – MASS) знаходять все більше застосування при виконанні завдань з морських транспортних перевезень, дослідження ресурсів океанів та наукових досліджень, природоохоронних робіт та робіт із забезпечення морського права на морі у провідних морських країнах світу [1].

Створення та впровадження у морську практику такого виду морських суден на сьогодні оцінюється як магістральний напрямок розвитку водного транспорту [2].

Порівняно з традиційними суднами з екіпажами БНС мають наступні переваги:

- можуть виконувати більш тривалі й небезпечні місії;
- мають нижчі витрати на технічне обслуговування та екіпажі для керування;
- мають малу вагу та невеликі розміри, що забезпечує підвищену маневреність і можливість розгортання на мілководних акваторіях (річкових й прибережних районах), де більші кораблі не можуть ефективно діяти;
- мають більшу потенційну вантажо-підйомність і можливість дистанційно виконувати типові морські операції.

Одним з перспективних напрямків розвитку БНС на сьогодні є проектування та будівництво безекіпажних надводних катерів (БНК, в англomовній літературі – Unmanned Surface Boats, USB), призначених для виконання широкого спектру природоохоронних місій на мілководних (глибиною до 50-60 метрів) акваторій. Для територіальних вод України це можуть бути місії з комплексного вивчення гідрофізичних та гідохімічних властивостей внутрішніх морів, озер, річок та інших внутрішніх водоймищ, дослідження наслідків техногенних катастроф на річкових інженерних спорудах, гуманітарне розмінування акваторій для забезпечення безпечного судноплавства та інших [3, 4].

У зв'язку з цим створення та використання БНК сьогодні є одним з головних напрямків розвитку технічних засобів робототехніки, призначених для вивчення та захисту водного середовища.

Мета роботи – визначити та науково обґрунтувати множину основних задач щодо зовнішнього і внутрішнього проектування нового типу надводного судна-робота – безекіпажного надводного катера, спроможного виконувати природоохоронні місії на мілководних акваторіях держави.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Попередній аналіз публікацій дає змогу констатувати, що до основних напрямків застосування БНК сьогодні можна віднести:

наукові дослідження водного середовища (збір даних про гідрофізичні та гідрохімічні характеристики, батиметричні дослідження) [5-8];

природоохоронний моніторинг навколишнього середовища (контроль забруднення водного середовища та його очищення) [9, 10];

пошуково-рятувальні операції [11];

морських інженерних робіт [12, 13];

оборонні технології [14-16].

У морських дослідженнях, зокрема моніторингу навколишнього середовища, БНК мають вирішальне значення з-за їх здатності збирати цінні та детальні масиви даних про характеристики води без витрат або ризиків, пов'язаних зі збором даних людьми. Безекіпажні катери також забезпечують ключові технології для гідрографічних досліджень, картографування морського дна за допомогою гідролокатора високої роздільної здатності та підтримки вивчення морської іхтіофлори та іхтіофауни.

Крім того, заслуговує на увагу публікація [17], присвячена проектуванню малорозмірних безекіпажних катерів – річкових дронів різного призначення та типорозмірів. Запропонована авторами лінійка річкових дронів частково ґрунтується на загальному аналізі експлуатаційних вимог оборонного характеру, проте не охоплює усього спектру можливих застосувань БНК.

Таким чином, у наведених публікаціях, зазвичай, досліджуються окремі питання створення і застосування БНК різного призначення, проте питання системного підходу до процесу проектування у цих роботах залишилися поза увагою авторів. Наукове формулювання завдань проектування БНК природоохоронного призначення наразі у науково-технічній літературі не висвітлене.

Формування цілей статті

Прибережні мілководні акваторії відносяться до таких, що найбільш активно використовуються у господарській діяльності морських держав. Водночас ці акваторії сприймають великий антропогенний вплив у результаті промислової діяльності та воєнних конфліктів. На сьогодні це найбільш характерно для прибережної частини територіальних вод України, де за останні два роки у результаті воєнних дій накопичилась велика кількість екологічно небезпечних та вибухонебезпечних об'єктів. Тому природоохоронний моніторинг мілководних акваторій та їх очищення від небезпечних об'єктів антропогенного походження сьогодні мають розглядатись як єдина задача загальнодержавного значення.

Безекіпажні надводні катери на цей час є одним з перспективних засобів морської робототехніки. Оснащення БНК змінним приладовим, інструментальним та комунікаційним обладнанням робить їх ефективним технічним засобом для виконання широкого переліку роботизованих природоохоронних місій.

Процес проектування таких катерів як об'єктів автоматичного керування доцільно виконувати як єдиний комплекс робіт зовнішнього і внутрішнього проектування.

Висвітлення основного матеріалу статті

Прибережні мілководні акваторії відносяться до таких, що найбільш активно використовуються у господарській діяльності морських держав. Водночас ці акваторії сприймають великий антропогенний вплив у результаті промислової діяльності та воєнних конфліктів. На сьогодні це найбільш характерно для прибережної частини територіальних вод України, де за останні два роки у результаті воєнних дій накопичилась велика кількість екологічно небезпечних та вибухонебезпечних об'єктів. Тому природоохоронний моніторинг мілководних акваторій та їх

очищення від вибухонебезпечних об'єктів сьогодні мають розглядатись як єдина задача загальнодержавного значення.

Безекіпажні катери є ефективною морською платформою для виконання широкого спектра морських робіт природоохоронного, наукового та промислового призначення, а також для виконання пошукових робіт для гуманітарного розмінування акваторій [18-19]. Оснащення БНК змінним приладовим, інструментальним та комунікаційним обладнанням робить їх ефективним технічним засобом для виконання широкого переліку роботизованих природоохоронних місій.

Особливо ефективним вбачається застосування БНК у прибережних водах (до 12 морських миль), де спостерігається найбільша морегосподарська діяльність.

Такі судна доцільно створювати для реалізації наступних роботизованих морських операцій:

- для приладового моніторингу підводного, надводного та повітряного простору морської акваторії P_M ;

- для взяття проб донного ґрунту, води та повітря на морській акваторії P_S з метою їх подальшого експрес-аналізу на борту БНК або у береговій лабораторії;

- для пошуку та обстеження затонулих об'єктів, які утворюють загрози життю і здоров'ю людей та створюють загрозу судноплавству P_{SE} (складова гуманітарного розмінування акваторій);

- для виконання технічних робіт P_T за допомогою бортових засобів морської робототехніки – автономних підводних апаратів, прив'язних самохідних та буксируваних підводних апаратів, малорозмірних безекіпажних суден та безпілотних літальних апаратів коптерного типу.

Узагальнену множину природоохоронних операцій БНК представлено нижче:

$$P_{USB} = \{P_M; P_S; P_{SE}; P_T\}. \quad (1)$$

Розглянемо тепер особливості зовнішнього проєктування природо-

охоронного БНК, коли встановлюється його відповідність експлуатаційним вимогам (застосуванню за призначенням).

Аналіз показує, що обґрунтування технічних характеристик БНК та обґрунтування технічних характеристик його приладового та інструментального обладнання утворює окрему прикладну наукову задачу. Її розв'язок можливий на основі застосування системного підходу [20], який передбачає врахування взаємного впливу усіх значущих складових новостворюваного катера на його архітектурно-конструктивний тип, енергетичне та інформаційне забезпечення, рівень автоматизації та комунікаційні можливості як морського робота, врахування низки експлуатаційних властивостей катера. Такий взаємний вплив між складовими БНК доцільно аналізувати у наступній послідовності операцій:

- природоохоронне завдання U_Z , яке має виконати БНК;

- морська технологія U_T , яку має реалізувати БНК для виконання завдання U_Z ;

- множина природоохоронних робіт U_J , які треба виконати за даною технологією U_T ;

- множина задач U_F для виконавчих механізмів Y_{USB} , які реалізують роботи U_J . Таким чином, маємо наступну послідовність операцій конструктора-системотехніка S щодо проєктування БНК:

$$S = U_Z \rightarrow U_T \rightarrow U_J \rightarrow U_F. \quad (2)$$

Множина задач U_F утворює інформаційну базу для формування переліку природоохоронного обладнання катера Y_{USB} і може бути використана для формування технічного обрис майбутніх складових БНК – його приладового та інструментального обладнання, яке визначає функціональні (експлуатаційні) властивості катера, а також для формування вимог до системи автоматичного керування БНК як носія цього обладнання.

Оскільки природоохоронний БНК має велику групу G_{USB} бортових засобів природоохоронного призначення та морської робототехніки (літальних та підводних апаратів-роботів), його архітектурно-конструктивний тип доцільно обирати у вигляді одноострівного тримарана з баковою надбудовою, а вказані бортові засоби розміщати на верхній палубі катера [21].

Проектування БНК на основі залучення принципів системного підходу можна представити наступними фазами:

- формулювання основних чинників майбутнього застосування БНК X_P (постановча фаза, кінцевим продуктом якої є розробка технічних вимог до майбутнього катера);

- проектування продукту (креативна фаза, кінцевим результатом P_P якої є загальна структура та склад продукту K , його попередні матеріальні M , енергетичні E , інформаційні I та експлуатаційні J характеристики);

- технічне конструювання продукту C_P (інженерна фаза, кінцевим результатом якого є технічний проєкт, який відповідає технічним вимогам до катера).

Таким чином, у загальному випадку з позицій системного підходу проектування природоохоронного катера можна представити множиною базових операцій:

$$S = \{X_P; P_P; C_P\} \Big|_G. \quad (3)$$

Сформуємо основні переліки обладнання, необхідного для розв'язку задач катера як об'єкта керування згідно (1), у вигляді трьох основних груп:

- групи приладового обладнання G_D , яке включає прилади екологічного моніторингу та експрес-аналізу водного та повітряного середовища G_{D-E} , а також гідроакустичні, магнітометричні та оптичні прилади G_{D-D} для пошуку екологічно небезпечних та вибухо-небезпечних предметів, які утворюють загрозу життю і здоров'ю людей та створюють загрозу судноплавству;

- групи інструментального обладнання G_I , яке включає дистанційно керовані розмивачі ґрунту та насоси для

відкачування ґрунту G_{I-H} , необхідні для очищення донної поверхні мілководних акваторій, дистанційно керовані маніпулятори G_{I-M} для виконання технічних робіт під водою на мілководних акваторіях та дистанційно керовані установки підводного бетонування G_{I-B} для виконання будівельних підводних робіт, метою яких є захист водного середовища від антропогенних джерел забруднення;

- групи бортових засобів морської робототехніки G_{MR} , за допомогою яких виконуються детальний приладовий моніторинг великих за площею акваторій G_{MR-M} та виконуються технічні підводні та надводні роботи G_{MR-J} на таких акваторіях.

Тоді повний перелік обладнання, призначеного для виконання природоохоронних задач (1) можна представити множиною:

$$G_{USB} = \{G_D; G_I; G_{MR}\} = \{G_{D-E}; G_{D-D}; G_{I-H}; G_{I-M}; G_{I-B}; G_{MR-B}; G_{MR-O}\}. \quad (4)$$

Результатом зовнішнього проектування БНК має бути визначення загальних експлуатаційних та техніко-економічних вимог J_S до катера. На цьому етапі виконується:

- аналіз областей та умов використання катера J_{S-A} ;

- розробка узагальненої концепції його застосування J_{S-C} ;

- операційне моделювання основних режимів роботи катера J_{S-M} ;

- техніко-економічне обґрунтування J_{S-F} .

Тоді підмножина J_S робіт з формування експлуатаційних та техніко-економічних вимог буде мати вид:

$$J_S = \{J_{S-A}; J_{S-C}; J_{S-M}; J_{S-F}\}. \quad (5)$$

Таким чином, на етапі зовнішнього проектування на основі параметричних досліджень перспективних БНК як агентів берегового центру керування (БЦК) природоохоронними місіями, та на основі аналізу їх взаємодії з іншими складовими БЦК, прогнозуються необхідні загальні характеристики майбутнього катера як об'єкта автоматичного керування та виконується оцінка його функціональної ефективності.

Отримані техніко-економічні вимоги БНК J_S дають змогу сформулювати технічне завдання (ТЗ) на проектування катера.

Відношення (1)-5) утворюють науково-методологічне підґрунтя для постановки і розв'язку задач зовнішнього проектування катера, призначеного для природоохоронних місій на мілководних акваторіях.

Розглянемо тепер задачі внутрішнього проектування БНК, які стосуються розробки катера як інженерного автоматично керованого об'єкта.

З позицій автоматичного керування БНК доцільно розглядати як спеціалізований периферійний пристрій центрального керуючого комп'ютера, що розташований на береговому центрі досліджень водного середовища (БЦД, в англійській літературі – Coastal Research Center, CRC) і дистанційно керує процесом збору та обробки інформації про водне середовище.

У зв'язку з цим до сучасних БНК висувається низка вимог, характерних для роботизованих технологічних процесів. Зокрема, це:

- вимоги щодо забезпечення надійності конструкції катера як інженерного об'єкта в екстремальних морських умовах експлуатації;

- вимоги щодо енергетичного забезпечення функціонування БНК на протязі виконання автономної морської місії;

- вимоги до рівня їх інформаційного забезпечення, зокрема, вимоги до системи автоматичного керування катером та системи його навігації і зв'язку з БЦД;

- вимоги до показників експлуатаційної ефективності застосування БНК – продуктивності його роботи, повноти та достовірності отримуваних результатів вимірювань характеристик водного середовища, складності технічного обслуговування БНК та інші.

Тому для формулювання задач створення БНК використано системний

підхід, який передбачає врахування взаємного впливу усіх значущих складових новостворюваного інноваційного технічного об'єкта [20].

Теоретичним підґрунтям застосування системного підходу для створення БНК у цій роботі прийнято концепцію аналізу складних систем, яка всі процеси і явища розглядає у взаємозв'язку матерії, енергії та інформації [22, 23]. Автори адаптували вказану концепцію до задач створення нових засобів морської робототехніки шляхом аналізу «рівнянь існування» таких засобів за матеріальним критерієм (рівняння мас і об'ємів морського робота), за енергетичним та інформаційним критеріями, а також ввели додатковий критерій оцінки проєктів – критерій функціональної ефективності створюваного засобу робототехніки [24].

Розробку БНС пропонується виконувати як послідовність наступних робіт:

- аналіз технічних вимог J_S до БНК як периферійного пристрою БЦД згідно (5) як результат зовнішнього проектування катера;

- дослідницьке проектування БНК J_{DR} ;

- ескізне проектування БНК J_{DE} ;

- технічне проектування БНК J_{DT} ;

- розробка робочої конструкторської документації J_{DD} для будівництва БНК;

- будівництво БНК J_B ;

- випробування БНК J_T .

Таким чином, генеральна множина основних робіт J_{USB} , направлених на розв'язок задач зі створення БНК на етапі внутрішнього проектування, має вигляд:

$$J_{USB} = \{J_S; J_{DR}; J_{DE}; J_{DT}; J_{DD}; J_B; J_T\} \quad (6)$$

Дамо короткий аналіз особливостей виконання проєктної частини робіт J_{DR} , J_{DE} , J_{DT} і J_{DD} , наведених у (6).

Метою етапу дослідницького проектування є вибір раціональної форми корпусу катера (роботи J_{DR-H} з обґрунтування гідродинаміки корпусу), який би відповідав вимогам до морехідності та забезпечував виконання всього переліку режимів роботи катера. Крім того, необхідно виконати роботи з

обґрунтування основних параметрів катера і його систем J_{DR-P} , що забезпечують виконання заданих вимог (вибір головної енергетичної установки та рушійно-рульового комплексу катера, інтегрованої електроенергетичної системи катера, яка б забезпечила оптимізацію процесів зберігання та ефективного керованого використання бортової енергії з метою збільшення часу виконання місії).

Також на цьому етапі на основі аналізу ТЗ формується концепція БНК як носія обладнання для дослідження водного середовища J_{DR-C} .

При цьому з урахуванням принципів системного підходу визначаються в першому наближенні:

- основні масогабаритні J_{DR-G} характеристики БНК;
- енергетичні J_{DR-E} характеристики БНК;
- інформаційні J_{DR-I} характеристики проєктованого катера.

Крім того, на цьому етапі розробляється інформаційно-керуюче обладнання катера та формується закони керування J_{DR-U} ним згідно з алгоритмами виконання досліджень водного середовища. Це забезпечує автоматичне керування безпечним рухом БНК та його науково-дослідним обладнанням, зв'язок між катером та БЦК.

Важливою складовою робіт J_{DR-U} цього етапу є синтез систем автоматичного керування, які забезпечують ефективне застосування групи БНК та розробку вбудованих систем діагностики їх технічного стану.

Таким чином, це етап синтезу архітектурно-конструктивного типу та визначення основних розмірів катера, у процесі якого системно зв'язуються його гідродинамічні характеристики та характеристик рушіїв, структури устаткування і спорядження, технічних даних і режимів руху.

Підмножина J_{DR} робіт дослідницького проєктування БНК матиме вигляд:

$$J_{DR} = \{J_{DR-H}; J_{DR-P}; J_{DR-C}; J_{DR-G}; J_{DR-E}; J_{DR-I}; J_{DR-U}\}. \quad (7)$$

Вихідною інформацією робіт цього етапу є креслення загальних видів раціонального варіанта БНК, а також документація про його технічні, економічні і експлуатаційні характеристики. На підставі цих матеріалів ухвалюється рішення щодо доцільності подальшої розробки цього варіанту проєкту катера.

Метою ескізного проєктування (підмножина робіт J_{DE}), зазвичай, є широкі теоретичні J_{DE-T} та експериментальні J_{DE-Ex} дослідження елементів і систем БНК, виготовлення і дослідження у басейнах фізичної моделі корпусу катера (складова робіт $J_{DE-M} \in J_{DE}$). За результатами цих досліджень уточнюються гідродинамічний розрахунок катера, розрахунки стійкості і керованості, а також характеристик надійності БНК (складова робіт $J_{DE-R} \in J_{DE}$). На підставі цих розрахунків вносять відповідні виправлення в компоновку БНК, уточнюються вагові розрахунки.

Тобто, у результаті ескізного проєктування отримується проєктна конструкторська документація, яка містить принципові конструктивні рішення і дає загальне уявлення про будову та принцип дії БНК, а також дані, що визначають його відповідність призначенню.

Підмножина J_{DE} робіт ескізного проєктування БНК буде мати вид:

$$J_{DE} = \{J_{DE-T}; J_{DE-Ex}; J_{DE-M}; J_{DE-RC}\}. \quad (8)$$

Метою технічного проєктування є розробка конструкторської документації, яка містить остаточне технічне рішення щодо конструкції та складу обладнання БНК. При цьому має бути виконана множина робіт J_{DT} , яка охоплює повний опис конструкції катера J_{DT-O} , оцінку відповідності конструкторських рішень вимогам ТЗ J_{DT-TT} , оцінку рівня технологічності будівництва катера J_{DT-BT} та оцінку складності його експлуатації та ремонту J_{DT-OR} .

Підмножина J_{DT} робіт технічного проєктування БНК матиме вигляд:

$$J_{DT} = \{J_{DT-O}; J_{DT-TT}; J_{DT-BT}; J_{DT-OR}\}. \quad (9)$$

Метою заключного етапу проектування є розробка робочої конструкторської документації. Підмножина робіт J_{DD} цього етапу спрямована на практичну реалізацію заявлених характеристик і параметрів БНК. На цьому етапі випускається вся технічна документація J_{DD-TD} , необхідна для будівництва, складання та монтажу як окремих агрегатів і систем, так і катера у цілому. Розробляються креслення загальних видів агрегатів БНК, складальні і детальні креслення окремих його частин. Проводяться: експериментально-дослідницькі роботи J_{DD-ER} , пов'язані із впровадженням нових матеріалів, типів конструкцій; випробування міцності та ресурсні випробування конструкцій; стендові випробування J_{DD-SR} окремих систем та устаткування. Інформація, отримана на цьому етапі, дозволяє уточнити дані про проєкт і внести відповідні корективи в розрахунки, виконані на попередніх етапах.

Підмножина J_{DD} робіт цього етапу проектування БНК буде мати вид:

$$J_{DD} = \{J_{DD-TD}; J_{DD-ER}; J_{DD-SR}\}. \quad (10)$$

У процес проектування слід також включити виготовлення дослідних зразків БНК і їх випробування – лабораторні і морські, оскільки в ході цих випробувань визначаються фактичні характеристики катера і ступінь забезпечення вимог ТЗ. При виготовленні дослідних зразків здійснюється відпрацювання технічної документації і технології виготовлення БНК.

За підсумками цього етапу ухвалюється рішення про запуск системи в серійне виробництво.

Аналіз показує, що проектування БНК – це ітераційний процес, причому ітерації здійснюються як між основними етапами проектування, але і усередині кожного з них.

Відомо [20], що для ефективного контролю ефективності конструкторських рішень доцільно використовувати «рівняння існування» БНК за основними

показниками його функціонування згідно системному підходу:

- «рівняння існування» за критерієм CM_{USB} «Матерія» – рівняння мас і об'ємів БНК;

- «рівняння існування» за критерієм CE_{USB} «Енергія» – рівняння енергетичного балансу БНК (вид та параметри енергетичного забезпечення споживачів енергії БНК);

- «рівняння існування» за критерієм CI_{USB} «Інформація» – рівняння балансу інформаційних потоків, що циркулюють в БНК (внутрішні потоки інформації для керування виконавчими механізмами БНК та зовнішні інформаційні потоки системи зв'язку між БНК та БЦК);

- «рівняння існування» за критерієм CF_{USB} «Функціональність» – рівняння БНК, яке оцінює ефективність застосування БНК за призначенням (продуктивність, технічне обслуговування, зберігання, вплив на навколишнє середовище, транспортування, низькі власні фізичні поля, стійкість до штучних завад).

Розглянемо зазначені критерії більш детально.

У якості матеріального критерію CM_{USB} для оцінки можливості створення БНК можна використовувати рівняння мас і об'ємів, які широко застосовуються у суднобудуванні:

$$M_{USB} = \sum_{i=1}^n m_{Ai} + \sum_{j=1}^k m_{Bk} \leq M_{TT}; \quad (11)$$

$$V_{USB} = \sum_{i=1}^n v_{Ai} + \sum_{j=1}^k v_{Bk} \leq V_{TT}, \quad (12)$$

де $\sum_{i=1}^n m_{Ai}$ – сумарна маса елементів

постійного складу БНК (елементи конструкції, електрообладнання, інформаційно-навігаційний та рушійно-кермовий комплекси тощо); $\sum_{j=1}^k m_{Bk}$ – маса

елементів змінюваного обладнання БНК (прилади для дослідження водного середовища); M_{TT} , V_{TT} – відповідно,

гранично припустимі значення маси та об'єму БНК згідно ТЗ; n , k – кількість елементів БНК, відповідно, постійного та змінюваного складу.

У якості енергетичного критерію CE_{USB} для оцінки можливості створення БНК використаємо рівняння енергетичного балансу катера, яке характеризує рівень виконання вимог ТЗ:

$$P_{USB} \leq P_{TT}, \quad (13)$$

де P_{USB} , P_{TT} – відповідно, сумарна потужність джерел енергії поточного варіанту БНК, що проектується, та потужність БНК за вимогами ТЗ.

Критерій CI_{USB} дає змогу оцінити можливість створення БНК, який буде мати необхідний рівень автоматизації та інформаційно-комунікаційні характеристики згідно до вимог ТЗ.

До інформаційної складової БНК доцільно віднести наступні складові:

- систему автоматичного керування просторовим рухом БНК;
- систему інформаційного обміну між БНК та БЦК (систему зв'язку);
- систему навігаційного забезпечення БНК (сукупність різних технічних засобів та приладів, призначених для визначення просторового положення катера та контролю параметрів його руху);
- систему автоматичного керування технологічним обладнанням катера (приладами та обладнанням, призначеним для дослідження водного середовища).

Тому рівняння існування БНК за цим критерієм доцільно складати у формі системи з трьох основних аналітичних відношень:

$$CI_{USB-Mov} \geq CI_{USB-TT}; \quad (14)$$

$$CI_{USB-Com} \geq CI_{USB-TT}; \quad (15)$$

$$CI_{USB-Nav} \geq CI_{USB-TT}; \quad (16)$$

$$CI_{USB-Tech} \geq CI_{USB-TT}; \quad (17)$$

де $CI_{USB-Mov}$, $CI_{USB-Com}$, $CI_{USB-Nav}$, $CI_{USB-Tech}$ – відповідно, кількісні показники якості функціонування поточного варіанту

інформаційно-керуючого обладнання БНК, що проектується;

CI_{USB-TT} – показники якості функціонування інформаційно-керуючого обладнання БНК згідно до вимог ТЗ.

Ефективність конструкторського рішення поточного варіанту БНК за критерієм CF_{USB} «Функціональність» доцільно сформулювати як систему вимог, які мають забезпечувати основні експлуатаційні характеристики БНК як засобу морської робототехніки відповідно до вимог ТЗ.

До таких вимог можуть відноситись:

- продуктивність виконання завдань з дослідження водного середовища F_{USB-P} ;
- рівень складності технічного обслуговування БНС F_{USB-S} ;
- надійність системи зв'язку БНК з БЦК F_{USB-R} ;
- стійкість функціонування в умовах дії штучних завад F_{USB-AO} ;
- рівень впливу на навколишнє середовище F_{USB-IE} .

Тому рівняння існування БНК за критерієм «Функціональність» доцільно складати у формі системи наступних аналітичних відношень, які характеризують ступінь відповідності поточного варіанту БНК, що проектується, вимогам ТЗ:

$$CF_{USB-P} \geq CF_{USB-TT}; \quad (18)$$

$$CF_{USB-S} \leq CF_{USB-TT}; \quad (19)$$

$$CF_{USB-R} \geq CF_{USB-TT}; \quad (20)$$

$$CF_{USB-AO} \geq CF_{USB-TT}; \quad (21)$$

$$CF_{USB-IE} \leq CF_{USB-TT}; \quad (22)$$

де CF_{USB-P} , CF_{USB-S} , CF_{USB-R} , CF_{USB-AO} , CF_{USB-IE} – відповідно, кількісні показники поточного варіанту БНК за критерієм CF_{USB} «Функціональність»; CF_{USB-TT} – показники БНК за критерієм CF_{USB} відповідно до вимог ТЗ.

Таким чином, відношення (7)-(22) утворюють зручне інформаційне підґрунтя для проектувальників БНК, оскільки дають

змогу оперативно оцінювати відповідність поточного варіанту БНК, що проєктується, вимогам ТЗ. Вони можуть використовуватись конструкторами на кожному з вище зазначених етапів (6) проєктування БНК.

Висновки

1. Сформульовано та науково обґрунтовано множину основних задач щодо зовнішнього і внутрішнього проєктування нового типу надводного судна-робота – безекіпажного надводного катера, спроможного виконувати природоохоронні місії на мілководних акваторіях держави.

2. Зовнішнє проєктування таких катерів як сучасних засобів морської робототехніки запропоновано виконувати на основі системного підходу, який враховує взаємний вплив характеристик його архітектурно-конструктивного типу, енергетичних, інформаційно-керуючих та функціональних (експлуатаційних) характеристик. Запропоновано генеральну множину основних робіт, направлених на створення безекіпажного надводного катера як об'єкта керування, який виконує дослідження водного середовища.

3. Запропоновано генеральну множину основних робіт, направлених на розв'язок задач зі створення БНК на етапі внутрішнього проєктування, яка ґрунтується на системі «рівнянь існування» катера та на системному підході. Це суттєво спрощує процес вибору кращого варіанта катера як об'єкта автоматизації, скорочує тривалість та підвищує якість проєкту.

4. Сформульовані у результаті дослідження множина природоохоронних задач, множина операцій конструктора-системотехніка щодо проєктування БНК, а також множини задач внутрішнього проєктування БНК утворюють інформаційне підґрунтя для створення безекіпажного природоохоронного катера як об'єкта керування, що призначений для досліджень внутрішніх водойм та приморських акваторій держави.

Список використаних джерел

1. Joel Coito. Maritime Autonomous Surface Ships: New Possibilities and Challenges in Ocean Law and Policy. Published by *the Stockton Center for International Law*, 2021. Vol. 97. 49 p. <https://digital-commons.usnwc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2955&context=ils>
2. The Future is Now: Unmanned and Autonomous Surface Vessels and Their Impact on the Maritime Industry. Benedict's Maritime Bulletin December 2017. <https://www.blankrome.com/publications/future-now-unmanned-and-autonomous-surface-vessels-and-their-impact-maritime-0>
3. 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. https://www.akademiabaru.com/doc/ARSRV16_N1_P12_17.pdf
4. Блінцов В.С., Надточий А.В. Гуманітарне розмінування мілководних акваторій: технології та робототехнічне забезпечення. *Суднобудування та морська інфраструктура*, 2024. Випуск №1 (18). С. 4-10.
5. Multi-Missions Unmanned Surface Vehicles (USVs). https://www.ecagroup.com/en/multi-missions-unmanned-surface-vehicles-usvs?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIpL6q28fqIQMV3qloCR0qSAjeEAAAYASAAEgL79vD_BwE
6. Unmanned Surface Vehicles (USV). <https://www.oceansciencetechnology.com/suppliers/unmanned-surface-vehicles/>
7. Semih Kale. Developments in Unmanned Surface Vehicles (USVs): A Review. *5th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*. July 10-12. 2023. Konya, Turkey. DOI: <https://doi.org/10.59287/icaens.1064>
8. Fernando Sotelo-Torres, Laura V Alvarez, Robert C Roberts. An Unmanned Surface Vehicle (USV): Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys. *Sensors* (Basel). 2023. Apr 30;23(9):4420. DOI: [10.3390/s23094420](https://doi.org/10.3390/s23094420)

9. MANTAS T12. Unmanned Surface Vessel. <https://martacsystems.com/products/t12/>

10. Daniele Bertin, Paolo Cesana, Marco Lucci. U-Ranger - An Unmanned Surface Vehicle for surface and underwater missions. 2009. (Безпілотний надводний апарат для надводних і підводних місій) <https://www.scribd.com/document/766828769/AUVSI-CALZONI>

11. Dina Khaled, Hussien Aly, Mariam Khaled, Nourhan Mahmoud. Development of a Sustainable Unmanned Surface Vehicle (USV) for Search and Rescue Operations. *Conference Paper. 5th IUGRC International Undergraduate Research Conference, Military Technical College, Cairo, Egypt, August 9th – Aug 12th, 2021.* DOI: [10.21608/IUGRC.2021.246530](https://doi.org/10.21608/IUGRC.2021.246530).

12. Cable Inspections the Uncrewed Way. <https://www.hydro-international.com/content/article/cable-inspections-the-uncrewed-way>

13. Unmanned Cleaning Boat. <https://relong-tech.com/product/amh-unmanned-cleaning-boat>

14. Elbit Systems UK uses Seagull USV during Anti-Submarine Warfare trials with UK MoD. <https://www.auvsi.org/industry-news/elbit-systems-uk-uses-seagull-usv-during-anti-submarine-warfare-trials-uk-mod>

15. У Японії випробовують безпілотний надводний катер. <https://mil.in.ua/uk/news/u-yaponiyi-vyprobuvuyut-bezpilotnyj-nadvodnyj-kater/>

16. Maria T.Reyes. New drone boat boosts Philippine Coast Guard's law enforcement, environmental protection efforts. October 15, 2024.

17. Бондаренко О.В., Ястреба О.П. Обґрунтування проєктних характеристик автономних річкових катерів. *ЗНП НУК*, 2024. №2. С. 3-10. DOI: [10.15589/znp2024.2\(495\).1](https://doi.org/10.15589/znp2024.2(495).1)

18. Patterson, Ruth G.; Lawson, Emily; Udyawer, Vinay; Brassington, Gary B.; Groom, Rachel A.; Campbell, Hamish A. "Uncrewed Surface Vessel Technological Diffusion Depends on Cross-Sectoral Investment in Open-Ocean Archetypes: A Systematic Review of USV Applications and

Drivers". *Frontiers in Marine Science*. 2022. 8. DOI: [10.3389/fmars.2021.736984](https://doi.org/10.3389/fmars.2021.736984).

19. Quantum lidar developed for underwater research. <https://hightech.fm/2023/05/05/acquires-lidar>

20. 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.

21. Fossen T.I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control – Norway: John Wiley & Sons Ltd. 2011. 596 p. DOI: [10.1002/9781119994138](https://doi.org/10.1002/9781119994138)

22. Gordana Dodig Crnkovic. Information and Energy/Matter. *Information* 2012. Vol. 3(4). P. 751-755. DOI: [10.3390/info3040751](https://doi.org/10.3390/info3040751)

23. Dirk K. F. Meijer. Information: what do you mean? *On the formative element of our universe. Syntropy Journal*. 2012. Vol. 3. P. 1-49. https://www.researchgate.net/publication/275017053_Information_What_Do_You_Mean

24. Blintsov V., Kucenko P. Application of systems approach at early stages of designing unmanned towed underwater systems for shallow water areas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 5/9 (101). P. 15-24. DOI: [10.15587/1729-4061.2019.179486](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179486)

References

1. Joel Coito. Maritime Autonomous Surface Ships: New Possibilities and Challenges in Ocean Law and Policy. Published by *the Stockton Center for International Law*, 2021. Vol. 97. 49 p. <https://digital-commons.usnwc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2955&context=ils>

2. The Future is Now: Unmanned and Autonomous Surface Vessels and Their Impact on the Maritime Industry. *Benedicts Maritime Bulletin* December 2017. <https://www.blankrome.com/publications/future-now-unmanned-and-autonomous-surface-vessels-and-their-impact-maritime-0>

3. 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. https://www.akademiabaru.com/doc/ARSRV16_N1_P12_17.pdf
4. Blintsov V.S., Nadtochyi A.V. Humanitarne rozminuvannia milkovodnykh akvatorii: tekhnologii ta robototekhnichne zabezpechennia. *Sudnobuduvannia ta morska infrastruktura*, 2024. Vypusk №1 (18). S. 4-10. [in Ukrainian]
5. Multi-Missions Unmanned Surface Vehicles (USVs). https://www.ecagroup.com/en/multi-missions-unmanned-surface-vehicles-usvs?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIpL6q28fqiQMV3qloCR0qSAjeEAAYASAAEgL79vD_BwE
6. Unmanned Surface Vehicles (USV). <https://www.oceansciencetechnology.com/suppliers/unmanned-surface-vehicles/>
7. Semih Kale. Developments in Unmanned Surface Vehicles (USVs): A Review. *5th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences*. July 10-12. 2023. Konya, Turkey. DOI: <https://doi.org/10.59287/icaens.1064>
8. Fernando Sotelo-Torres, Laura V Alvarez, Robert C Roberts. An Unmanned Surface Vehicle (USV): Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys. *Sensors* (Basel). 2023. Apr 30;23(9):4420. DOI: [10.3390/s23094420](https://doi.org/10.3390/s23094420)
9. MANTAS T12. Unmanned Surface Vessel. <https://martacsystems.com/products/t12/>
10. Daniele Bertin, Paolo Cesana, Marco Lucci. U-Ranger - An Unmanned Surface Vehicle for surface and underwater missions. 2009. (Bezpilotnyi nadvodnyi aparat dlia nadvodnykh i pidvodnykh misii) <https://www.scribd.com/document/766828769/AUVSI-CALZONI>
11. Dina Khaled, Hussien Aly, Mariam Khaled, Nourhan Mahmoud. Development of a Sustainable Unmanned Surface Vehicle (USV) for Search and Rescue Operations. *Conference Paper. 5th IUGRC International Undergraduate Research Conference, Military Technical College, Cairo, Egypt*, August 9th – Aug 12th, 2021. DOI: [10.21608/IUGRC.2021.246530](https://doi.org/10.21608/IUGRC.2021.246530).
12. Cable Inspections the Uncrewed Way. <https://www.hydro-international.com/content/article/cable-inspections-the-uncrewed-way>
13. Unmanned Cleaning Boat. https://relog-tech.com/product/amh_unmanned_cleaning_boat
14. Elbit Systems UK uses Seagull USV during Anti-Submarine Warfare trials with UK MoD. <https://www.auvsi.org/industry-news/elbit-systems-uk-uses-seagull-usv-during-anti-submarine-warfare-trials-uk-mod>
15. U Yaponii vyprovovuiut bezpilotnyi nadvodnyi kater. <https://mil.in.ua/uk/news/u-yaponiyi-vyprovovuyut-bezpilotnyj-nadvodnyj-kater/> [in Ukrainian]
16. Maria T.Reyes. New drone boat boosts Philippine Coast Guards law enforcement, environmental protection efforts. October 15, 2024.
17. Bondarenko O.V., Yastreba O.P. Obgruntuvannia proiektnykh kharakterystyk avtonomnykh rickovykh kateriv. *ZNP NUK*, 2024. №2. S. 3-10. DOI: [10.15589/znp2024.2\(495\).1](https://doi.org/10.15589/znp2024.2(495).1) [in Ukrainian]
18. Patterson, Ruth G.; Lawson, Emily; Udyawer, Vinay; Brassington, Gary B.; Groom, Rachel A.; Campbell, Hamish A. "Uncrewed Surface Vessel Technological Diffusion Depends on Cross-Sectoral Investment in Open-Ocean Archetypes: A Systematic Review of USV Applications and Drivers". *Frontiers in Marine Science*. 2022. 8. DOI: [10.3389/fmars.2021.736984](https://doi.org/10.3389/fmars.2021.736984).
19. Quantum lidar developed for underwater research. <https://hightech.fm/2023/05/05/acquires-lidar>
20. 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.
21. Fossen T.I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control – Norway: John Wiley & Sons Ltd. 2011. 596 p. DOI: [10.1002/9781119994138](https://doi.org/10.1002/9781119994138)

22. Gordana Dodig Crnkovic. Information and Energy/Matter. *Information* 2012. Vol. 3(4). P. 751-755. DOI: [10.3390/info3040751](https://doi.org/10.3390/info3040751)

23. Dirk K. F. Meijer. Information: what do you mean? *On the formative element of our universe. Syntropy Journal*. 2012. Vol. 3. P. 1-49. https://www.researchgate.net/publication/275017053_Information_What_Do_You_Mean

24. Blintsov V., Kucenko P. Application of systems approach at early stages of designing unmanned towed underwater systems for shallow water areas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. No 5/9 (101). P. 15-24. DOI: [10.15587/1729-4061.2019.179486](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179486)

**TASK FOR CREATION AND CRITERIA
FOR CONTROL OF UNCREWED SURFACE
BOAT FOR ENVIRONMENTAL
PROTECTION MISSIONS IN
SHALLOW WATER SEAS**

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, splashbox98@gmail.com

УДК 004.896

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-66-73

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЛІНІЇ НАНЕСЕННЯ ПОРОШКОВОГО ПОКРИТТЯ

Б. О. Лібус, А. М. Стеценко

*Національний університет водного господарства та природокористування;
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, Україна; e-mail: a.m.stetsenko@nuwm.edu.ua*

Основною метою цієї роботи є покращення якості покриття виробів порошковою фарбою шляхом впровадження ефективного контролю та регулювання процесу фарбування. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення економічної ефективності та екологічної безпечності технологій фарбування у промислових умовах. У ході виконання даного дослідження було проведено опис і детальний аналіз існуючої технології нанесення порошкових фарб та обладнання, що використовується на ТОВ «Високовольтний союз – РЗВА». Проведено системний аналіз об'єкта автоматизації, на основі чого визначено ключові проблеми, які впливають на якість кінцевого продукту. Сформульовано технічні вимоги до автоматизації процесу фарбування, вибрано сучасні технічні засоби для автоматизації та розроблено функціональну схему, яка забезпечує контроль та стабільність процесу нанесення порошкових фарб. Особливу увагу приділено створенню програмного забезпечення, яке дозволяє інтегрувати контрольовані параметри в технологічний процес з максимальною точністю та мінімальним впливом людського фактору. Описана технологія нанесення порошкової фарби є екологічно чистою та безвідходною. Процес формування полімерного покриття передбачає напilenня полімерного порошку на поверхню виробу та подальшу полімеризацію у термічній печі під заданою температурою. Такий підхід дозволяє отримувати захисні та декоративні покриття високої якості, які є стійкими до зовнішніх впливів. Результати цієї роботи мають практичне значення для вдосконалення технології нанесення порошкових покриттів, підвищення якості продукції та конкурентоспроможності підприємства на ринку. Впроваджені рішення з автоматизації також сприяють зниженню енергетичних витрат і мінімізації впливу людського фактору.

Ключові слова: автоматизація, порошкове покриття, функціональна схема автоматизації, промисловий контролер, полімеризація, піч, температура.

The main goal of this work is to improve the quality of powder coating of products by implementing effective control and regulation of the painting process. The relevance of the study is due to the need to increase the economic efficiency and environmental safety of painting technologies in industrial conditions. In the course of this study, a description and detailed analysis of the existing technology for applying powder paints and equipment used at LLC "High Voltage Union - RZVA" was carried out. A systematic analysis of the automation facility was carried out, on the basis of which key problems affecting the quality of the final product were identified. Technical requirements for the automation of the painting process were formulated, modern technical means for automation were selected and a functional scheme was developed that ensures control and stability of the powder paint application process. Special attention was paid to the creation of software that allows you to integrate controlled parameters into the technological process with maximum accuracy and minimal human factor influence. The described technology for applying powder paint is environmentally friendly and waste-free. The process of forming a polymer coating involves spraying polymer powder onto the surface of the product and subsequent polymerization in a thermal oven at a given temperature. This approach allows you to obtain high-quality protective and decorative coatings that are resistant to external influences. The results of this work are of practical importance for improving the technology of applying powder coatings, improving product quality and the competitiveness of the enterprise in the market. The implemented automation solutions also contribute to reducing energy costs and minimizing the impact of the human factor.

Keywords: automation, powder coating, functional automation scheme, industrial controller, polymerization, furnace, temperature.

Вступ

Основна ідея нанесення покриття із застосуванням електростатичного поля високої напруги полягає у притяганні заряджених часток фарби до протилежно зарядженої (заземленої) поверхні деталі.

Для нанесення порошкових фарб придатні більшість термостійких твердих тіл і насамперед металевих деталей. На даний час технологія порошкового фарбування широко поширена при виготовленні виробів різного призначення завдяки таким

перевагам, як якість, чистота та економічність.

Високопродуктивна лінія порошкового покриття датської фірми Ideal Line, що використовується на заводі, дозволяє відмовитись від традиційного фарбування, надає виробам сучасного зовнішнього вигляду і значно підвищує їх корозостійкість.

Мета роботи – полягає в створенні системи автоматизації процесу нанесення порошкового покриття, що забезпечить: підвищення якості продукції разом зі зниженням її собівартості та виробничих витрат; оптимізацію витрат на матеріали, сировину та енергоресурси; ефективніше використання потужностей підприємства та збільшення обсягів готової продукції; розширення асортименту виробів і покращення їх конкурентоспроможності; покращення умов праці персоналу та мінімізацію кількості дефектів.

Технологія нанесення порошкового покриття

Технологія порошкового фарбування забезпечує довговічне та якісне покриття, яке вирізняється стійкістю до зношування й корозії. Вона є економічною альтернативою традиційним лакофарбовим матеріалам завдяки своїм чудовим захисним властивостям і естетичному вигляду, що створює гладке та рівномірне покриття. Основою порошкової фарби є полімерний порошок, що складається з полімерної смоли, затверджувачів і кольорових пігментів. Під час нагрівання порошок проходить процес полімеризації, формуючи необхідну поверхню.

З розвитком технологій порошкове фарбування стало доступним не лише для металевих виробів. Останніми роками значно розширився спектр матеріалів, на які можна наносити порошкове покриття, а методи його нанесення стали ще ефективнішими. Основною метою вдосконалень є підвищення економічності процесу та скорочення часу фарбування.

Ефективність фарбування залежить від швидкості подачі порошку та його кількості. Чим більшу площу покриває

порошок за одиницю часу, тим продуктивнішим стає процес. На великих підприємствах автоматизовані конвеєри, що переміщують вироби через спеціальні камери напилення, дозволяють суттєво зменшити витрати часу та підвищити показники виробництва.

Особливістю порошкового фарбування є те, що фарба осідає лише у потрібній кількості, а надлишки матеріалу залишаються нейтральними, що знижує втрати. Проте важливо забезпечити оптимальне співвідношення нанесеної фарби до площі покриття, щоб мінімізувати кількість рекуперованого матеріалу.

Рівномірність покриття має значення навіть для складних поверхонь із важкодоступними зонами. Це досягається правильним регулюванням заряду та повітряного тиску в обладнанні для напилення.

Процес порошкового фарбування складається з трьох основних етапів: підготовки поверхні; нанесення порошкового матеріалу; формування покриття.

Підготовка поверхні. Якість порошкового покриття безпосередньо залежить від ретельності підготовки виробу, що має таке ж значення, як і при роботі з рідкими, гальванічними чи силікатними покриттями. Порошкове фарбування зазвичай виконується після завершення всіх механічних і термічних обробок. Виріб має відповідати певним вимогам: уникати відкритих країв з радіусом менше 0,3 мм, виступаючих елементів, недосконалих зварних швів, крапель, пропалин чи тріщин. Поверхня повинна бути повністю сухою, очищеною від нагару, іржі (для металевих виробів), мастил чи інших забруднень, що можуть вплинути на якість покриття.

2. Нанесення порошкового покриття. Пістолети-розпилювачі з живильниками складають установку нанесення порошкової фарби, що забезпечує одержання суміші порошкової фарби з повітрям, утворення струменя і набуття частками порошкової фарби електричного заряду. Установка складається з таких

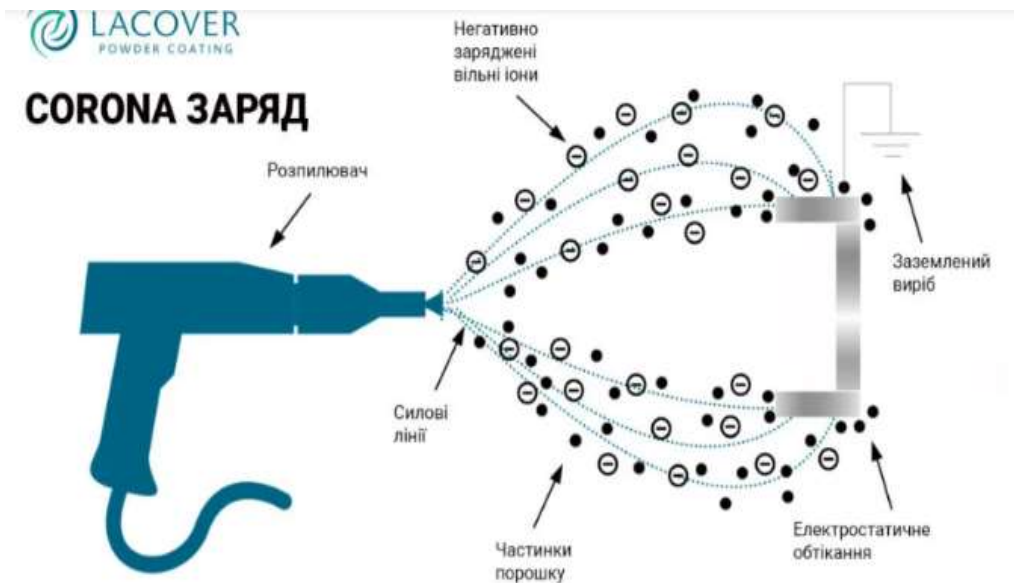


Рисунок 1 – Стівбур напилювача

складових: бункер подачі порошкової фарби, де порошкова фарба перетворюється на суміш повітря + порошкова фарба; інжектор - забезпечує подачу "спец. суміш" до напилювача; пульт керування пневмофункціями і заряду порошку; напилювач.

Застосовують два способи заряду часток: коронуючим електродом, що знаходиться під високою напругою, і з використанням "трибоекфету", тобто ефекту набування зарядів дотичними тілами, виготовленими з різних матеріалів.

При першому способі застосовується підведення високої (20-100 тис. В) постійної за знаком напруги до коронуючого електрода від спеціального генератора високої напруги, що розташовується залежно від конструкції всередині пістолета або поза ним. У випадку ручних пістолетів варто віддавати перевагу генераторам, убудованим у пістолет, тому що при цьому забезпечується більш висока безпека працівника (підведення до пістолета безпечної напруги від 9 до 30 В в залежності від моделі) і виключається необхідність приєднання до пістолета високовольтного кабелю, більш твердого і важкого в порівнянні з низьковольтним, що викликає підвищену стомлюваність працюючого.

При другому способі зарядки часток стівбур і інші деталі пістолета, з якими стикається порошкова фарба, виготовляється зі спеціального матеріалу - фторопласта. Для фарбування деталей зі складною геометрією зручніше застосовувати порошковий розпилювач, оснащений трибостатичною зарядкою.

Однак продуктивність процесу нанесення фарби пістолетами-розпилювачами з трибозарядом знижена, а відсоток осідання порошкової фарби на виріб нижче, ніж при застосуванні пістолетів-розпилювачів з коронуючим електродом.

3. Формування покриття. Проведення цієї операції пов'язано із процесами сплавки часток, розтікання розплаву і хімічного затвердіння (у випадку термореактивних фарб). Особливо важливе дотримання режиму затвердіння термореактивних фарб, оскільки будь-яке відхилення від нього негативно позначається на властивостях одержуваних покриттів. Недотвердіння (недогрів) впливає на механічні властивості (покриття руйнуються при ударі і вигині), перетвердіння (перегрів) - на колір і блиск покриттів. Відзначимо, що під температурою затвердіння у документації зазначається температура на поверхні виробу, а не в печі. Звідси загальний час

перебування виробу в печі T складається з часу його нагрівання T_1 і часу затвердіння T_2 : $T=T_1+T_2$. Час повного нагрівання T_1 (у хв) приблизно може бути визначене як $T_1=3A$, де A - товщина металевого виробу (чи стінки) у мм.

Для оплавлення, формування плівки та затвердіння порошкового покриття використовуються різні типи печей: тупикові та прохідні, з електричним обігрівом або нагріванням топковими газами, горизонтальні та вертикальні, одно- та багатоходові. Основна вимога до таких печей для забезпечення високої якості покриття — це рівномірний прогрів виробу з нанесеною порошковою фарбою до заданої температури, відповідної характеристикам фарби, і підтримання цієї температури протягом часу, необхідного для затвердіння. Для тупикових печей важливу роль також відіграє швидкість підвищення температури. Найкращим чином цим вимогам відповідають печі з рециркуляцією повітря. Більшість порошкових фарб затвердіють при температурі 180–200°C за 10–20 хвилин.

Варто зазначити, що під температурою затвердіння мається на увазі температура поверхні виробу, який фарбується, а не температура повітря в самій печі.

Розробка функціональної системи автоматизації

Розроблену функціональну схему автоматизації (ФСА) технологічного процесу показано на рис. 2. Як спостерігаємо, основними параметрами для контролю та регулювання є температура та вологість повітря. Для керування процесом обрано програмований логічний контролер (ПЛК) фірми Мікрол МІК-51. Розроблено систему автоматизації вентиляції, контролю напilenня і екстреного вимкнення. Процес напilenня розпочинається з натискання кнопки пуск. Подача порошкової фарби здійснюється зі спеціальної камери зі здатністю вибору потрібного кольору. Здійснюється контроль за інтенсивністю напilenня за допомогою ПЛК. При закінченні процесу напilenня вмикається

звуковий сигнал. Далі виріб по лінії іде в піч, а потім – у камеру охолодження.

Для вимірювання температури і вологості використовується двоканальний давач DHT-22 фірми AOSONG: вихід 1: $T(^{\circ}\text{C})$, $I_{\text{вих}}=4\text{--}20\text{mA}$; вихід 2: $W(\%)$, $I_{\text{вих}}4\text{--}20\text{mA}$. Для забезпечення регулювання привода вентиляції обрано частотний перетворювач Altivar 58.

Розрахунок та моделювання системи автоматизованого регулювання

Було виконано моделювання системи припливної вентиляції камери напilenня з використанням електропривода. Поставлено завдання: забезпечити досягнення заданої температури повітря (22°C) у максимально короткий час без перевищення встановленого температурного ліміту.

Для характеристики динамічних властивостей асинхронного двигуна використано математичну модель, побудовану на основі лінеаризованої механічної характеристики [3]. Динаміку вентилятора було проігноровано, розглядаючи механічну систему як одномасову з еквівалентним моментом інерції. Частотний перетворювач моделювався як аперіодична ланка, що враховує час розгону та гальмування, заданий у параметрах перетворювача для обмеження струмових перевантажень [2].

Структурну схему моделі зображено на рис. 3. Здійснено налаштування ПІД-регулятора і здобуто перехідну характеристику системи рис. 4. При цьому налаштування ПІД-регулятора такі: $K_p=0,1197$, $K_i=0,03356$, $K_d=0$.

Розробка програмного забезпечення

Програмне забезпечення для керування технологічним процесом на базі ПЛК МІК-51 розроблено у середовищі Альфа і наведено на рис. 5. Програмний пакет «АЛЬФА» слугує редактором FBD-програм, призначеним для розробки програмного забезпечення на мові функціональних блоків для мікропроцесорних контролерів серій МІК-51 і МІК-52, виготовлених компанією «МІКРОЛ».

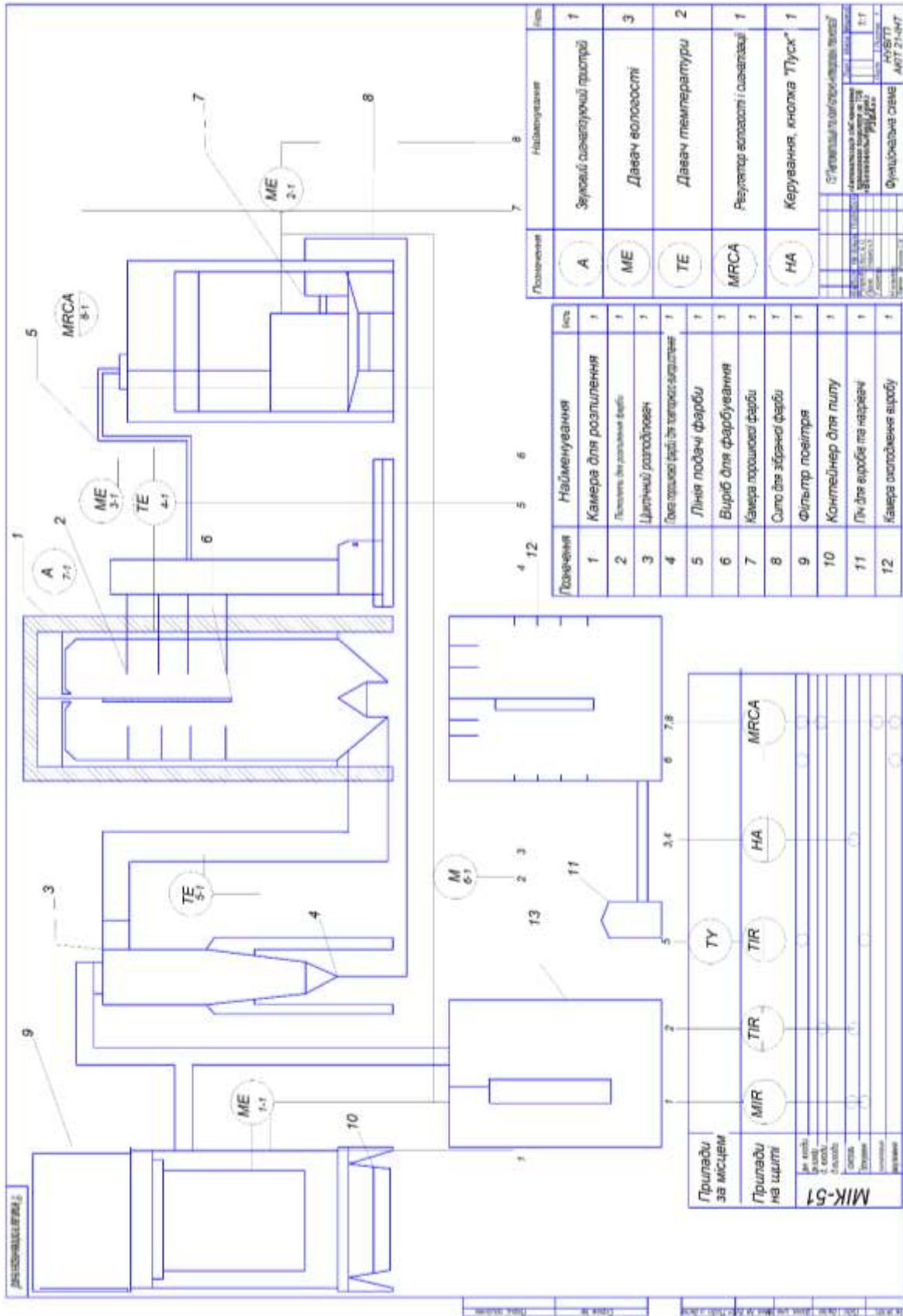


Рисунок 2 – ФСА технологічного процесу нанесення порошкового покриття

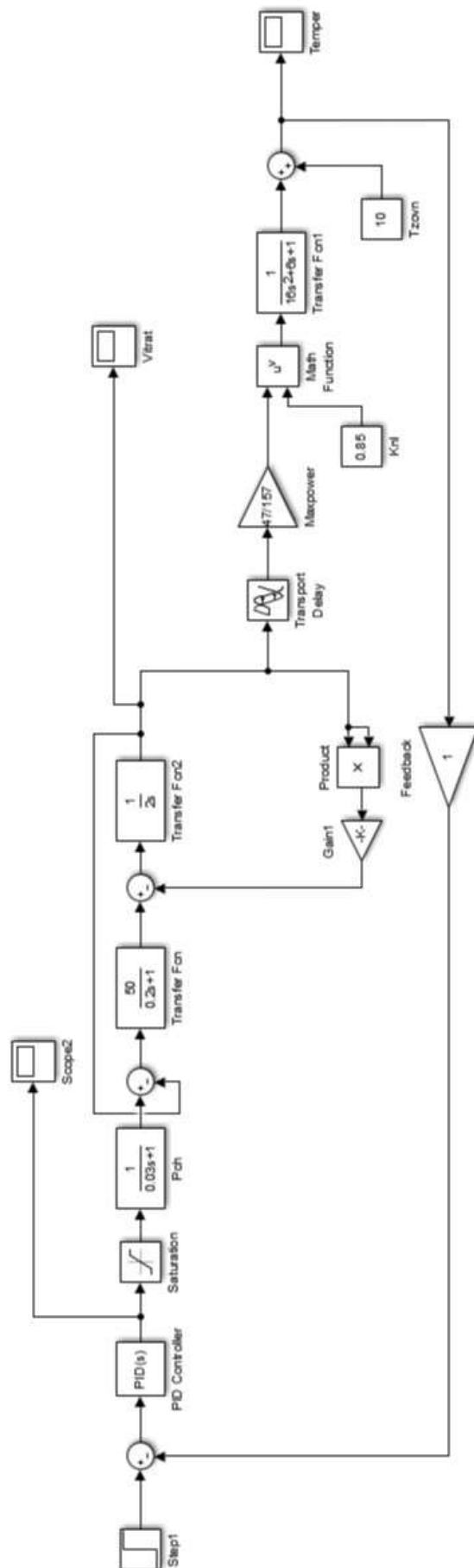


Рисунок 3 – Модель системи припливної вентиляції камери наплення з електроприводом

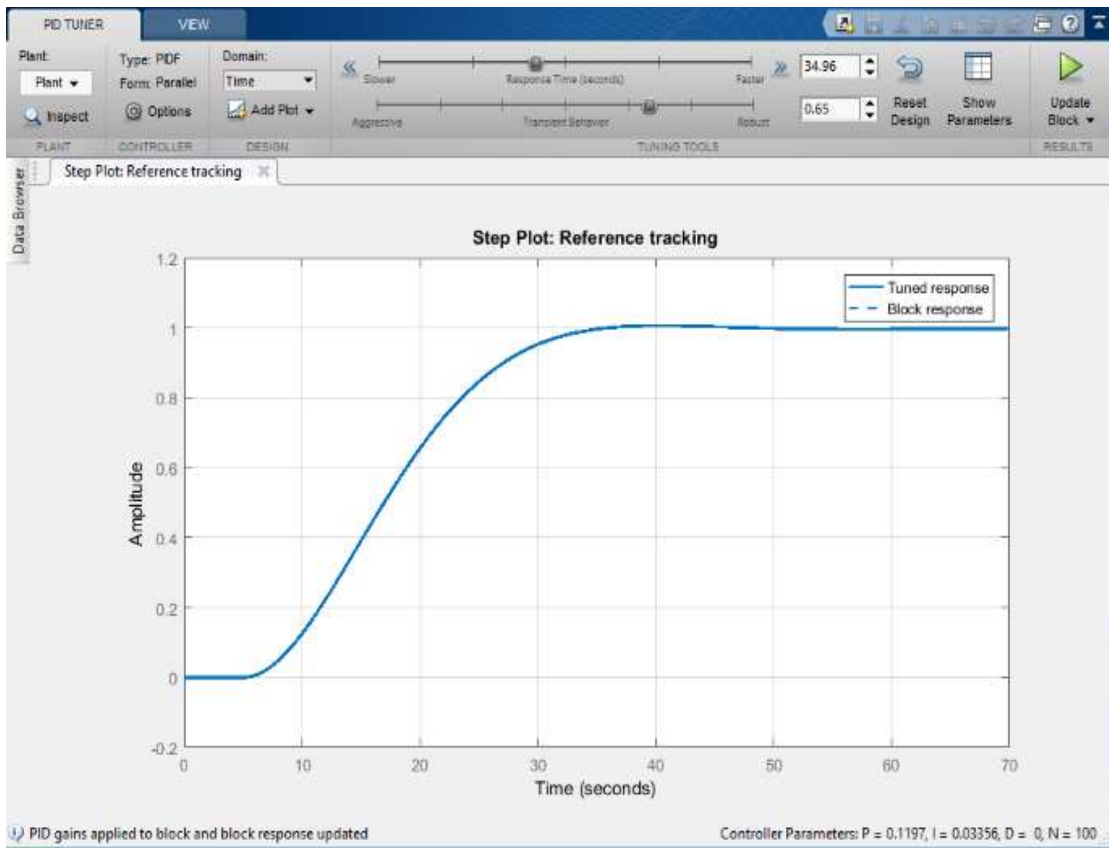


Рисунок 4 – Перехідна характеристика системи припливної вентиляції

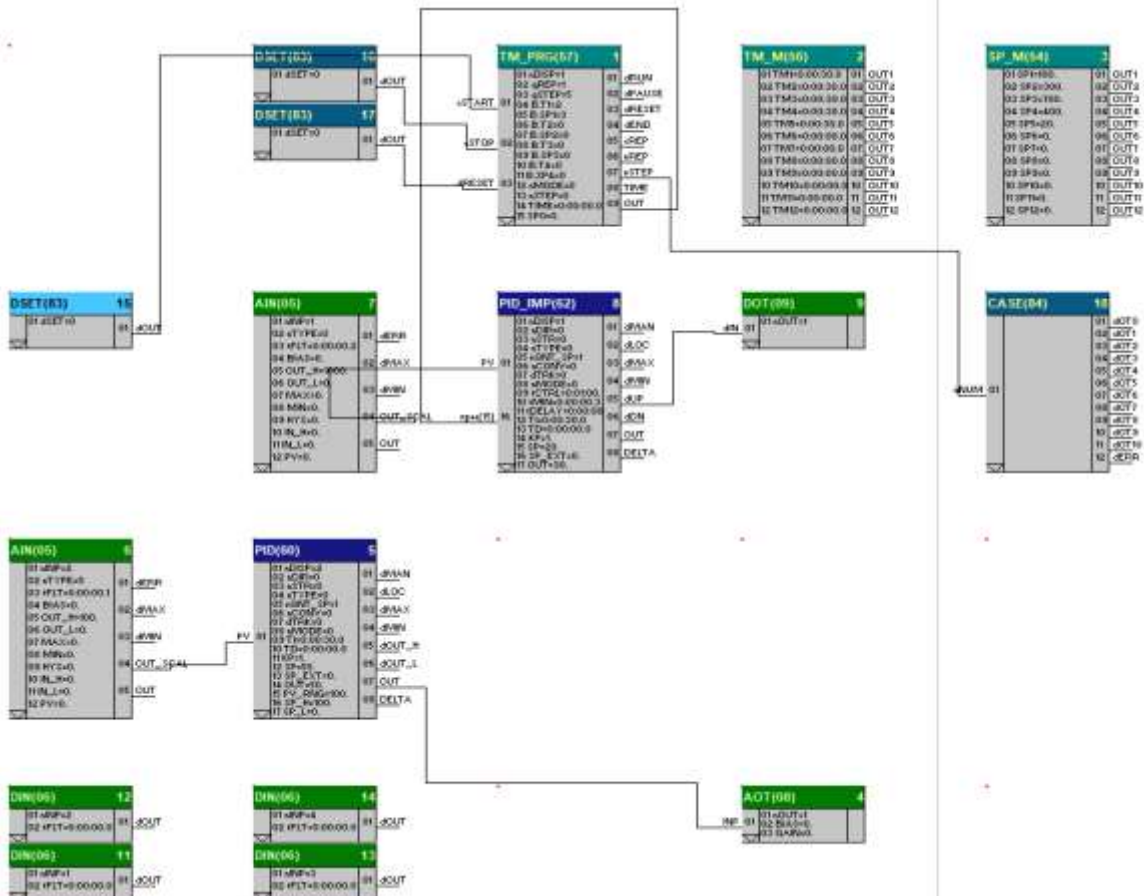


Рисунок 5 – Програмне забезпечення для керування технологічним процесом

Систему програмування розроблено у відповідності до стандарту Міжнародної Електротехнічної Комісії (IEC) 1131-3 та призначено для створення прикладного програмного забезпечення, що забезпечує керування технологічними процесами на основі програмованих контролерів [1].

Висновки

Розглянуто технологію процесу нанесення порошкового покриття, розроблено ФСА процесу, вибрано технічні засоби автоматизації, здійснено моделювання системи припливної вентиляції камери напилення, розроблено програмне забезпечення для ПЛК МІК-51.

Список використаних джерел

1. Ельперін І.В. Промислові контролери: Навчальний посібник. Київ: НУХТ, 2003. 320 с.
2. Клепач М.І. Теорія автоматичного керування. Лабораторні роботи. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Рівне: НУВГП, 2008. 206 с.
3. Баховець Б.О. Автоматизований електропривод. Навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2009. 96 с.
4. Nicholas P. Liberto. User's Guide to Powder Coating. Society of Manufacturing Engineers. 2003. P. 185.
5. P. Liberto. Powder Coating: The Complete Finisher's Handbook. Powder Coating Institute. 1994. P. 419.
6. Smith A., Johnson B., Williams C. Optimization of Electrostatic Powder Coat Cure Oven Process. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2019. P.12.
7. Arthur A. Tracton Coatings Technology Handbook. CRC Press. 2005. P.936.
8. Emmanouil Spyrou. Powder Coatings Chemistry and Technology. Hanover, Vincentz Network. 2012. P.30.

References

1. Elperin I.B. Promyslovi kontrolery: Navchalnyi posibnyk. Kyiv: NUKhT. 2003. P. 320. [in Ukrainian]
2. Klepach M.I. Teoriia avtomatychnoho keruvannia. Laboratorni roboty. Navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchyykh navchalnykh zakladiv. Rivne: NUVHP. 2008. P. 206. [in Ukrainian]
3. Bakhovets B.O. Avtomatyzovanyi elektropryvod. Navchalnyi posibnyk. Rivne: NUVHP. 2009. P. 96. [in Ukrainian]
4. Nicholas P. Liberto. Users Guide to Powder Coating. Society of Manufacturing Engineers. 2003. P.185.
5. P. Liberto. Powder Coating: The Complete Finishers Handbook. Powder Coating Institute. 1994. P.419.
6. Smith A., Johnson B., Williams C. Optimization of Electrostatic Powder Coat Cure Oven Process. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2019. P.12.
7. Arthur A. Tracton Coatings Technology Handbook. CRC Press. 2005. P.936.
8. Emmanouil Spyrou. Powder Coatings Chemistry and Technology. Hanover, Vincentz Network. 2012. P.30.

AUTOMATION OF POWDER COATING LINE

B. O. Libus, A. M. Stetsenko

National University of Water Management and Environmental Management; 11 Soborna St., Rivne, 33028, Ukraine; e-mail: a.m.stetsenko@nuwm.edu.ua

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ, ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ТА ДИСКРЕТНІ СТРУКТУРИ

УДК 697.85

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-74-88

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО ПРОЦЕСУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ СЕПАРАЦІЇ

*М. І. Горбійчук, І. С. Єднак**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна; e-mail: ihor4698@gmail.com*

Газ, добутий зі свердловини, містить домішки - кисень, азот, сірководень, а також конденсат, важкі вуглеводні бутан пропан та їх похідні. Перш ніж газ направити споживачам, його очищають. Процес очищення газу протікає у дві стадії; на першій його очищають від механічних домішок, а на другій стадії із газу вилучають воду важкі вуглеводи й конденсат. У випадку, коли газ під високим тиском (не менше 14 МПа) виходить зі свердловини, ефективним методом його очищення є низькотемпературна сепарація, в основі якої лежить ефект Джоуля-Томсона. Суть ефекту Джоуля-Томсона у тому, що процес дроселювання природного газу зумовлює пониження його температури до мінусових значень. Умовою ефективності процесу низькотемпературної сепарації є дотримання технологічного регламенту, який забезпечується засобами місцевої автоматики, яка виконує функції стабілізації параметрів технологічного процесу. Наявні системи автоматичної стабілізації є одноконтурними й не враховують існування перехресних зв'язків між технологічними параметрами, що значно знижує ефективність процесу низькотемпературної сепарації. Тому метою роботи було створення математичної моделі процесу низькотемпературної сепарації, що дало змогу виявити існуючі перехресні зв'язки між технологічними параметрами, що є методологічною основою синтезу ефективної системи керування процесом сепарації. На основі закону збереження кількості речовини й закономірностей обміну речовин між рідкою і газовою фазами отримані математичні моделі статичної та динамічної частини процесу низькотемпературної сепарації у термінах «вхід-вихід». Виконана лінеаризація математичної моделі динамічної частини процесу низькотемпературної сепарації та на її основі отримана матрична передавальна функція об'єкта, що дало змогу формалізувати канали внутрішніх взаємовпливів між вхідними та вихідними величинами.

Ключові слова: низькотемпературна сепарація, математична модель, лінеаризація, передавальні функції, структурна схема.

The gas extracted from the well contains impurities - oxygen, nitrogen, hydrogen sulfide, as well as condensate, heavy hydrocarbons butane propane and their derivatives. Before the gas is sent to consumers, it is purified. The gas purification process takes place in two stages; in the first stage, it is purified from mechanical impurities, and in the second stage, water, heavy hydrocarbons and condensate are removed from the gas. In the case when gas under high pressure (not less than 14 MPa) comes out of the well, an effective method of its purification is low-temperature separation, which is based on the Joule-Thomson effect. The essence of the Joule-Thomson effect is that the process of throttling natural gas causes its temperature to decrease to minus values. The condition for the effectiveness of the low-temperature separation process is compliance with the technological regulations, which are ensured by means of local automation, which performs the functions of stabilizing the parameters of the technological process. Existing automatic stabilization systems are single-loop and do not take into account the existence of cross-links between technological parameters, which significantly reduces the efficiency of the low-temperature separation process. Therefore, the aim of the work was to create a mathematical model of the low-temperature separation process, which made it possible to identify existing cross-links between technological parameters, which is the methodological basis for the synthesis of an effective separation process control system. Based on the law of conservation of mass and the regularities of the exchange of substances between the liquid and gas phases, mathematical models of statics and dynamics of the low-temperature separation process in terms of "input-output" were obtained. The mathematical model of the dynamics of the low-temperature separation process was linearized and the matrix transfer function of the object was obtained on its basis, which made it possible to formalize the channels of internal interactions between input and output values.

Keywords: low-temperature separation, mathematical model, linearization, transfer functions, structural diagram.

Вступ

Газ, видобутий зі свердловини, містить тверді домішки, важкі вуглеводи та конденсат. Перед тим як подати його споживачам чи в трубопровідний транспорт, газ очищають та вилучають з нього важкі вуглеводи, конденсат та воду. Якщо газ виходить зі свердловини під тиском не менше 14 МПа для очищення газу застосовують низькотемпературну сепарацію (НТС), в основі якого лежить ефект Джоуля-Томсона.

Ефективність процесу НТС залежить від дотримання технологічного режиму – температури, тиску та рівня рідини в сепараторі. Температура в сепараторі підтримується постійною за допомогою одноконтурної системи керування.

Стабілізація тиску і рівня за допомогою окремих систем автоматичної стабілізації не забезпечує належну якість процесу керування через наявність взаємовпливу між технологічними параметрами – тиском і рівнем рідини в сепараторі.

Тому актуальною є наукова задача підвищення якості процесу керування, яку можна розв'язати шляхом створення адекватної математичної моделі процесу низькотемпературної сепарації. Створена на основі синтезованої математичної моделі система автоматичного керування процесом НТС, зрештою, підвищить ефективність процесу підготовки природного газу, видобутого зі свердловини.

Аналіз літературних джерел

Процес низькотемпературної сепарації розроблений порівняно недавно [1] і протікає при температурах нижче мінус 5°C [2]. Температурний режим у сепараторі створюється енергією пластового тиску, який понижується, проходячи через дросельний пристрій. У результаті виникає ефект Джоуля – Томсона, що спричиняє зниження температури та тиску. При зниженні тиску на 1 МПа температура газу знижується [3] на 5,5 °C. Пониження тиску пластового газу здійснюється за допомогою дроселя,

вихрової труби [4] або детандера [2]. Детандер – пристрій, який перетворює потенційну енергію газу в механічну енергію. Внаслідок чого газ розширюється, здійснює роботу й охолоджується.

Математичне моделювання самого процесу низькотемпературної сепарації ґрунтується на використанні закономірностей, які мають місце в парорідинній системі. Якщо парорідинна система знаходиться у рівноважному стані, то відбувається процес обміну масами між рідинною і газовою фазами. Рушійною силою такого процесу є хімічний потенціал компонентів системи. [5].

У процесі роботи сепаратора із газової суміші виділяється конденсат і важкі вуглеводні, які переходять у рідку фазу, що призводить до зміни мас газової та рідинної фаз.

Така зміна мас рідинної та газової фаз викликає зміну технологічних параметрів – рівня рідини і тиску газу в сепараторі. Оскільки рівень рідини й тиск газу в сепараторі є регульованими параметрами [6], то математичний опис динаміки їх змін ґрунтується на законі збереження кількості маси [7].

При моделюванні процесу низькотемпературної сепарації однією з основних задач є виявлення взаємозв'язку між складом суміші і фугітивністю, яка є мірою відхилення реальної системи «рідина-газ» від ідеальної (ідеальний газ, ідеальний розчин). Фугітивність i -го компонента суміші залежить від температури, тиску і складу суміші [8]. Треба відзначити, що не існує аналітичної залежності для визначення фугітивності як функції від перерахованих параметрів. Тому визначення фугітивності є досить складною задачею, яка ґрунтується на експериментальних дослідженнях [9].

Відмітимо, що у роботах [6] – [8] отримана математична модель процесу низькотемпературної сепарації як об'єкта автоматичного керування з припущенням, що газ і конденсат підкоряються законам ідеальних розчинів. Таке припущення не відповідає реальним умовам процесу НТС,

який відбувається при високих тисках і низьких температурах.

Метою роботи є розроблення математичної моделі процесу НТС, у якій буде враховано ту обставину, що фугітивність і коефіцієнт стисливості газу є функціями тиску (при постійній температурі), що дозволить отримати математичну модель, придатну для синтезу автоматичної системи керування процесом НТС.

Поставлена мета вимагала вирішення в роботі таких завдань:

- визначити вхідні та вихідні параметри об'єкта керування, сформулювати основні припущення й створити математичну модель процесу низькотемпературної сепарації в термінах «вхід-вихід»;

- лінеаризувати математичну модель динаміки процесу низькотемпературної сепарації та визначити матричні передавальні функції процесу НТС;

- синтезувати структурну схему процесу НТС, як об'єкта автоматичного керування, та дослідити динамічні властивості такого об'єкта шляхом проведення машинного експерименту.

Математична модель динаміки процесу низькотемпературної сепарації

Спрощена функціональна схема установки НТС зображена [7] на рис. 1. Газ, видобутий зі свердловини, надходить до теплоносія (газу), який подається в міжтрубний простір теплообмінника Т1. Осушений газ із сепаратора С-2 надходить до теплообмінника, де підігрівається, а потім подається до газового колектору. Для запобігання гідратуутворенню до вхідного газового потоку перед сепаратором С-2 додають діетеленгліколь (ДЕГ). За рахунок різниці густин конденсату і ДЕГ відбувається гравітаційне розділення рідких фаз. виділений ДЕГ потрапляє в ємності Р-1 і Р-2 (рис. 1).

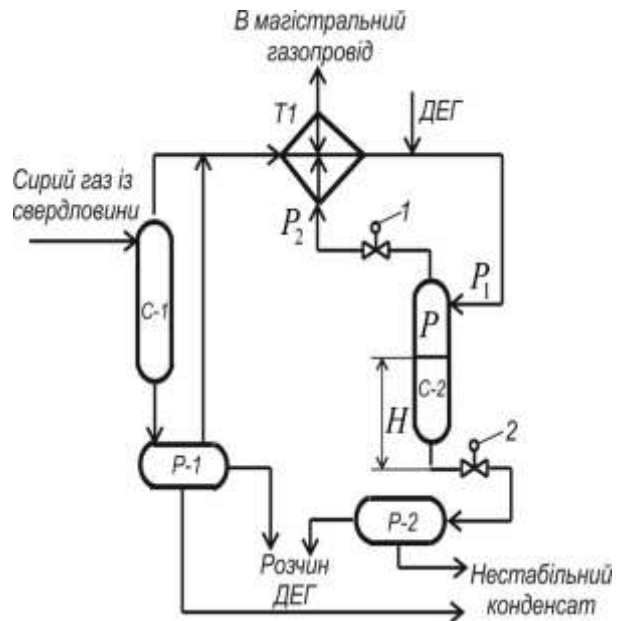


Рисунок 1 – Спрощена функціональна схема установки НТС

Математичну модель динаміки процесу НТС розроблена при таких припущеннях [7]:

- температурний режим в сепараторі С-2 (рис. 1) підтримується незмінним;
- густина рідинної фази в сепараторі вважається сталою;
- відомий хімічний склад газу, який поступає на сепарацію та мольна частка $\mu_{0i,s}$ його компонентів;

- мольна частка газу в суміші на вході до сепаратора С-2 вважається сталою.

Виходячи з аналізу процесу низькотемпературної сепарації як об'єкта автоматичного керування, визначимо такі змінні моделі:

- *вихідні величини* – тиск газу P та рівень рідинної фази H в сепараторі;

- *вхідні величини* – ступінь відкриття U_1 і U_2 виконавчих органів 1 і 2, які встановлені на виході та вході сепаратора С-2 (рис. 1);

- *збурення* – тиски в трубопроводах P_1 (на вході в сепаратор С-2), P_2 (на виході із сепаратора С-2) і P_3 (на зливі рідини із сепаратора С-2, рис. 1).

В основу математичної моделі низькотемпературної сепарації покладемо рівняння матеріального балансу. Якщо

M_{sb} маса речовини, яка знаходиться в ємності, а m_{ci} масові витрати, що подаються в ємність, або її покидають, то

$$\frac{dM_{sb}}{dt} = \sum_{i=1}^n m_{ci}. \quad (1)$$

У формулі (28) значення m_{ci} необхідно взяти зі знаком «плюс» коли потік направлений в ємність і зі знаком «мінус», якщо потік покидає ємність.

Запишемо рівняння (1) для рідини, що знаходиться в сепараторі С-2 (рис. 1). Величину M_{sb} будемо обчислювати за такою формулою:

$$M_{sb} = V_{lp} \rho_{lp},$$

де ρ_{lp} - середня густина рідинної фази.

Об'єм рідини V_{lp} є функцією рівня рідини H у ємності і її вигляд залежить від просторового розміщення сепаратора С-2 (рис. 1). Нехай V_0 повний об'єм сепаратора. Позначимо через $\nu(H)$ ступінь заповнення сепаратора [10]

$$\nu(H) = \frac{V_{lp}(H)}{V_0}.$$

Тоді

$$M_{sb} = V_0 \nu(H) \rho_{lp}. \quad (2)$$

Потік сировини на вході в сепаратор С-2 (рис. 1) вміщує газ, конденсат і вологу, які внаслідок сепарації переходять у рідку фазу. Кількісну оцінку рідкої фази дає така формула [14]:

$$m_{lq} = \varepsilon_{lq}(P, P_1) m. \quad (3)$$

У формулі (3) прийняті такі позначення:

коефіцієнт відділення води від газу [8]

$$\varepsilon_{lq}(P, P_1) = \theta(P, P_1) \times \left(f_d \sum_{j=1}^{N_c} \frac{\eta_j}{\mu_{w,j}} \sum_{i=1}^{N_{con}} \frac{\mu_{0i,s} \mu_{w,i}}{f_d + (1-f_d) f_i P^{-1}} + \frac{\Delta b_{mc}(z+1)}{\rho_{mix}} \right);$$

$$\theta(P, P_1) = \left(1 + \frac{1}{\rho_{mix}} (b_{mc,1} + \Delta b_{mc} z) \right)^{-1};$$

f_d - мольна частка конденсату у газовій суміші; P - тиск газу в сепараторі; P_1 -

тиск газу на вході в сепаратор; η_j - масова концентрація кожного компонента суміші, що поступає в сепаратор С-2 (рис. 1); $\mu_{w,i}$ - молярна маса i -го компонента суміші; $\mu_{0i,s}$ - мольні частки компонентів в нафтогазовій суміші, яка поступає на сепарацію; m - масова витрата сировини на вході в сепаратор С-2 (рис.

$$1); \quad \Delta b_{mc} = b_{mc,1} - b_{mc,2}; \quad b_{mc,1} = \frac{a_{m1}^{(1)}}{P_1} + a_{m2}^{(1)},$$

$$b_{mc,2} = \frac{a_{m1}^{(2)}}{P} + a_{m2}^{(2)} - \text{вологовміст газу на}$$

вході і в сепараторі; $a_{m1}^{(i)}$, $a_{m2}^{(i)}$, $i=1, 2$ - емпіричні коефіцієнти; ρ_{mix} - густина початкової газової суміші; $z = z_2 / (z_1 - z_2)$; z_1 , z_2 - відносні одиниці кількості гліколю на вході теплообмінника Т1 і виході із сепаратора С-2 (рис. 1); N_c - кількість компонентів в суміші, що поступає в сепаратор С-2; N_{con} - кількість компонентів рідкої фази на виході із сепаратора С-2; f_i - фугітивність, яка є мірою відхилення реальної системи «рідина-газ» від ідеальної (ідеальний газ, ідеальний розчин) і визначає такий тиск реальної системи, що здійснює таку ж дію на навколишнє середовище, як і ідеальна система [11].

Витрата сировини на вході в сепаратор С-2 (рис. 1), яка перебуває в газоподібному стані, будемо обчислювати за такою формулою:

$$m = \alpha \sqrt{K_g (P_1 - P) P_1}, \quad (4)$$

де α - коефіцієнт витрати.

Коефіцієнт K_g можна обчислити за допомогою такого виразу:

$$K_g = (514C)^2 \frac{\rho_g}{T},$$

де C - стала величина; ρ_g - густина газу

при $t = 20^\circ C$; $\rho_g = 0,7 \text{ кг} / \text{м}^3$;

T - температура газу $^\circ K$. Тому прихід потоку рідини в сепаратор буде таким:

$$m_{c1} = \varepsilon_{lq}(P, P_1) m.$$

Загальну масову витрату потоку рідини на вході в сепаратор будемо обчислювати за формулою (4). Тоді

$$m_{c1} = \alpha \varepsilon_{lq}(P, P_1) \sqrt{K_g (P_1 - P) P_1}. \quad (5)$$

Потік рідини, який покидає сепаратор характеризується масовою витратою m_{c1} , яку обчислимо за формулою

$$m_{c2} = \alpha_2(U_2) \sqrt{g \rho_{lp} H + P}, \quad (6)$$

де $\alpha_2(U_2)$ - коефіцієнт витрати, який є функцією положення регулюючого органу.

З врахуванням формул (2) – (6) вираз (1) буде таким:

$$\frac{dv(H)}{dt} = \frac{1}{V_0 \rho_{lp}} \left(\alpha \varepsilon_{lq}(P, P_1) \sqrt{K_g (P_1 - P) P_1} - \alpha_2(U_2) \sqrt{g \rho_{lp} H + P} \right). \quad (7)$$

Знайдемо масу газу в сепараторі С-2. Для реального газу, який займає об'єм V_g , справедливе співвідношення

$$PV_g = z_{gc} M_g R_g T, \quad (8)$$

де V_g - об'єм газу в сепараторі; z_{gc} - коефіцієнт стисливості; R_g - газова стала; T - температура газу.

Коефіцієнт стисливості газу є функцією тиску P і температури T . Така залежність є емпіричною. У роботі [12], з використанням рівняння Бенедикта-Вебба-Равіна [13], отримана емпірична модель залежності $z_{gc}(P, T)$ у вигляді полінома другого степеня

$$z_{gc}(P, T) = a_0 + a_1 P + a_2 T + a_3 P^2 + a_4 T^2 + a_5 P T. \quad (9)$$

Реалізація процесу низькотемпературної сепарації передбачає, що за допомогою системи автоматичного керування температура в сепараторі підтримується постійною. Отже, при $T = T_0$ коефіцієнт стисливості газу буде функцією лише тиску P і таку функцію отримано із (9), де $T = T_0$. З врахуванням останньої умови залежність (9) буде такою:

$$z_{gc}(P) = A_0 + A_1 P + A_2 P^2, \quad (10)$$

де $A_0 = a_0 + a_2 T_0 + a_4 T_0^2$; $A_1 = a_1 + a_5 T_0$; $A_2 = a_3$.

Із рівняння (8) знаходимо

$$M_g = \frac{PV_g}{z_{gc}(P) R_g T},$$

де $z_{gc}(P)$ є функцією тиску, яка задана формулою (10).

Газ в сепараторі С-2 займає лише частину від загального об'єму V_0 , тобто $V_g = V_0 - V_{lp}$. Враховуючи значення $V_{lp} = V_0 \nu(H)$, отримаємо $V_g = V_0 (1 - \nu(H))$. З врахуванням значення V_g , знаходимо масу газу в сепараторі С-2

$$M_g = \frac{PV_0 (1 - \nu(H))}{z_{gc}(P) R_g T}. \quad (11)$$

Прихід газу в сепаратор С-2 обчислимо за такою формулою [7]:

$$m_{g1} = \varepsilon_g(P, P_1) m,$$

де m - обчислюється за формулою (4), а [7]

$$\varepsilon_g(P, P_1) = \theta(P, P_1) \left((1 - f_d) \times \sum_{j=1}^{N_c} \frac{\eta_j}{\mu_{w,j}} \sum_{i=1}^{N_{com}} \frac{\mu_{0i,s} \mu_{w,i}}{f_d + (1 - f_d) f_i(P) P^{-1}} + \frac{b_{mc,2}}{\rho_{mix}} \right).$$

Отже,

$$m_{g1} = \alpha \varepsilon_g(P, P_1) \sqrt{K_g (P_1 - P) P_1}. \quad (12)$$

Витрата газу із сепаратора С-2 в магістраль буде такою:

$$m_{g2} = \alpha_1(U_1) \sqrt{K_g (P - P_2) P}, \quad (13)$$

де $\alpha_1(U_1)$ - коефіцієнт витрати, який є функцією положення регулюючого органу.

Формули (12) і (13) дають змогу отримати математичну модель для газової фракції, тобто

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{PV_0 (1 - \nu(H))}{z_{gc}(P) R_g T} \right) = \\ = \alpha \varepsilon_g(P, P_1) \sqrt{K_g (P_1 - P) P_1} - \\ - \alpha_1(U_1) \sqrt{K_g (P - P_2) P}. \end{aligned}$$

Допускаємо, що R_g і $T = T_0$ - сталі величини. Тоді

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P(1-v(H))}{z_{gc}(P)} \right) = \gamma_g (\alpha \varepsilon_g(P, P_1) \times \quad (14)$$

$$\times \sqrt{K_g(P_1 - P)P_1 - \alpha_1(U_1)} \sqrt{K_g(P - P_2)P},$$

$$\text{де } \gamma_g = \frac{R_g T_0}{V_0}.$$

Ступінь заповнення сепаратора залежить від форми сепаратора і його положення у просторі.

У рівнянні (7) обчислимо

$$\frac{dv(H)}{dt} = \frac{\partial v(H)}{\partial H} \cdot \frac{dH}{dt}.$$

Враховуючи формулу (7) і останнє співвідношення, отримали

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{V_0 \rho_{lp} q_p(H)} (\alpha \varepsilon_{lq}(P, P_1) \times \quad (15)$$

$$\times \sqrt{K_g(P_1 - P)P_1 - \alpha_2(U_2)} \sqrt{g \rho_{lp} H + P},$$

$$\text{де } q_p(H) = \frac{\partial v(H)}{\partial H}.$$

Знайдемо похідну за змінною t від лівої частини рівняння (14). Маємо

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P(1-v(H))}{z_{gc}(P)} \right) =$$

$$= \frac{1}{z_{gc}^2(P)} \left(\left(\frac{dP}{dt} (1-v(H)) - P \frac{dv(H)}{dt} \right) z_{gc}(P) - \right.$$

$$\left. - P(1-v(H)) \frac{dz_{gc}(P)}{dt} \right).$$

Оскільки $\frac{dz_{gc}(P)}{dt} = \zeta(P) \frac{dP}{dt}$, то

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P(1-v(H))}{z_{gc}(P)} \right) = \frac{1}{z_{gc}^2(P)} \times$$

$$\times \left[\frac{dP}{dt} (1-v(H)) (z_{gc}(P) - P \zeta(P)) - \right.$$

$$\left. - P z_{gc}(P) \frac{dv(H)}{dt} \right],$$

$$\text{де } \zeta(P) = A_1 + 2A_2 P.$$

Враховуючи знайдене значення правої частини рівняння (38), отримаємо

$$\frac{1}{z_{gc}^2(P)} \left(\frac{dP}{dt} (1-v(H)) (z_{gc}(P) - P \zeta(P)) - \right.$$

$$\left. - P z_{gc}(P) \frac{dv(H)}{dt} \right) = \gamma_g (\alpha \varepsilon_g(P, P_1) \times \quad (16)$$

$$\times \sqrt{K_g(P_1 - P)P_1 - \alpha_1(U_1)} \sqrt{K_g(P - P_2)P}.$$

У рівняння (16) замість $\frac{dv(H)}{dt}$ підставимо його значення із (7). Тоді

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{(1-v(H)) (z_{gc}(P) - \zeta(P)P)} \times$$

$$\times \left[z_{gc}^2 \gamma_g (\alpha \varepsilon_g(P, P_1) \sqrt{K_g(P_1 - P)P_1} - \right.$$

$$\left. - \alpha_1(U_1) \sqrt{K_g(P - P_2)P}) + \quad (17)$$

$$+ \frac{P z_{gc}(P)}{V_0 \rho_{lp}} (\alpha \varepsilon_{lq}(P, P_1) \sqrt{K_g(P_1 - P)P_1} - \right.$$

$$\left. - \alpha_2(U_2) \sqrt{g \rho_{lp} H + P}) \right].$$

Диференціальні рівняння (15) і (17) утворюють математичну модель процесу низькотемпературної сепарації, які є нелінійними відносно вхідних U_1, U_2 та вихідних P і T величин.

Коефіцієнт сепарації газу $\varepsilon_g(P, P_1)$ та коефіцієнт відділення рідинної фази від газу $\varepsilon_{lq}(P, P_1)$ [5], які фігурують у рівняннях (39) і (40), мати величину f_i , яка носить назву фугітивності.

Для знаходження фугітивності як функції тиску, в [14] зроблено таке припущення: фугітивність $f_i(P)$, яка визначається для кожного i -го компонента газової суміші, замінили на усереднену фугітивність $f(P)$ для відомого складу газової суміші. Тоді значення $f(P)$ визначили за такою формулою [14]:

$$f(P) = P \exp(-\alpha_p + \varphi_p(P)), \quad (18)$$

де

$$\alpha_p = A_1 P_{nc} + \frac{1}{2} A_2 P_{nc}^2;$$

$$\varphi_p(P) = (A_0 - 1) \ln \frac{P}{P_{nc}} + A_1 P + \frac{1}{2} A_2 P^2;$$

P_{nc} - тиск, при якому стан газу є ідеальним.

Допускаємо, що засоби автоматизації забезпечують невеликі відхилення регульованих величин від заданих (усталених) значень. У такому випадку нелінійні функції, що входять до моделі (15) і (17) можна розкласти в ряд Тейлора з утриманням лише лінійних членів розкладу.

Будемо позначати верхніми індексами «0» усталені значення вхідних і вихідних величин.

$$\text{Нехай } H = H^{(0)} + \Delta H, P = P^{(0)} + \Delta P,$$

$$U_1 = U_1^{(0)} + \Delta U_1, U_2 = U_2^{(0)} + \Delta U_2,$$

$$P_1 = P_1^{(0)} + \Delta P_1, P_2 = P_2^{(0)} + \Delta P_2.$$

Систему диференціальних рівнянь (15) і (17) запишемо у векторній формі

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = \bar{\varphi}(\bar{X}, \bar{U}, \bar{\Omega}), \quad (19)$$

де $\bar{X} = \begin{bmatrix} H \\ P \end{bmatrix}$ - вектор вихідних величин;

$\bar{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$ - вектор керуючих дій;

$\bar{\Omega} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}$ - вектор збурень;

$$\bar{\varphi}(\bar{X}, \bar{U}, \bar{\Omega}) = \begin{bmatrix} \varphi_1(\bar{X}, \bar{U}, \bar{\Omega}) \\ \varphi_2(\bar{X}, \bar{U}, \bar{\Omega}) \end{bmatrix} \quad \text{- вектор-}$$

функція правих частин системи диференціальних рівнянь (15) і (17).

Якщо нелінійну функцію $\bar{\varphi}(\bar{X}, \bar{U}, \bar{\Omega})$ розкласти в ряд Тейлора, обмежившись лише лінійними членами розкладу, то

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A\bar{x} + B\bar{u} + \Gamma\bar{\omega}, \quad (20)$$

$$\bar{y} = C\bar{x}, \quad (21)$$

де $A = J_{\varphi_x}(\bar{X}^{(0)}, \bar{U}^{(0)}, \bar{\Omega}^{(0)})$;

$$B = J_{\varphi_u}(\bar{X}^{(0)}, \bar{U}^{(0)}, \bar{\Omega}^{(0)});$$

$$\Gamma = J_{\varphi_{\omega}}(\bar{X}^{(0)}, \bar{U}^{(0)}, \bar{\Omega}^{(0)}) \quad \text{- матриці}$$

часткових похідних (матриці Якобі);

$$\bar{x} = \Delta\bar{X}; \quad x_1 = \Delta H; \quad x_2 = \Delta P; \quad \bar{u} = \Delta\bar{U};$$

$$u_1 = \Delta U_1; \quad u_2 = \Delta U_2; \quad \omega_1 = \Delta P_1; \quad \omega_2 = \Delta P_2;$$

$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ - вектор змінних стану;

$\bar{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$ - вектор керуючих дій;

$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}$ - вектор збурень;

$\bar{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$ - вектор вихідних величин;

C - одинична матриця.

Рівняння (20) і (21) є лінеаризованою математичною моделлю процесу низькотемпературної сепарації, в якій елементи матриць A , B і Γ обчислюються при усталених значеннях $\bar{X} = \bar{X}^{(0)}$, $\bar{U} = \bar{U}^{(0)}$ і $\bar{\Omega} = \bar{\Omega}^{(0)}$.

Оскільки матричне диференціальне рівняння записане в приростах відносно усталених значень, то початкові умови - нульові.

Обчислення параметрів лінеаризованої математичної моделі здійснювалось при таких вхідних даних: загальна витрата газу, яка поступає на сепарацію - $m = 2.3576 \text{ кг/с}$; кількість виділеного конденсату $m_{con} = 1.1574 \text{ кг/с}$; тиск газу перед сепаратором С-2 (рис. 1) $P_1 = 13.6 \text{ МПа}$; тиск в сепараторі С-2 $P = 5.3 \text{ МПа}$; тиск на вході в третю ступінь сепарації $P_2 = 1,2 \text{ МПа}$; температура газу на вході в сепаратор С-2 $T_{in} = 17^\circ \text{C}$; температура в сепараторі С-2 $T_0 = -21^\circ \text{C}$; точка роси газу по вологості при тиску 4 МПа не більше 4°C . Ємність низькотемпературного сепаратора має форму циліндра, розміщеного у просторі вертикально. Об'єм сепаратора - $2,5 \text{ м}^3$; діаметр сепаратора $d_s = 1.0 \text{ м}$; рівень конденсату в сепараторі $H^{(0)} = 1,2 \text{ м}$.

Оскільки тиск газу в сепараторі С-2 становить 5.3 МПа, то його стан буде відрізнятися від стану ідеального газу. За допомогою програмного забезпечення, створеного в середовищі MatLab, синтезована емпірична модель (34а) за таких умов: діапазон зміни тиску $P \in [1; 20]$ МПа; температури $T \in [-30; -10]$ °С. Були отримані такі значення параметрів регресійної моделі (9):

Коефіцієнти регресійного полінома	
$a_0 = -6.7212e-01$	$a_1 = -9.0154e-02$
$a_2 = 1.1313e-02$	
$a_3 = 1.7699e-03$	$a_4 = -1.8037e-05$
$a_5 = 1.4397e-04$	

Адекватність емпіричної моделі (9) перевірялась за допомогою коефіцієнта кореляції K_z [16]. Отримане значення $K_z = 0,9971$ свідчить про значну близькість «експериментальних» і обчислених значень за формулою (9) (рис. 2).

Вологовміст газу будемо визначати за формулою Бюкачека. Коефіцієнти a_{m1} і a_{m2} згідно [7] є такими:

$$a_{m1} = \frac{0,457}{1,42} \cdot \exp(0,0735t - 0,27 \cdot 10^{-3}t^2),$$

$$a_{m2} = 0,0418 \cdot \exp(0,054t - 0,2 \cdot 10^{-3}t^2),$$

де t - температура °С.

За відомими коефіцієнтами a_{m1} і a_{m2} визначимо

$$\theta(P, P_1) = \left(1 + \frac{1}{\rho_{mix}} (b_{mc,1} + \Delta b_{mc,z}) \right)^{-1},$$

де

$$b_{mc,1} = \frac{a_{m1}^{(1)}}{P_1} + a_{m2}^{(1)};$$

$$\Delta b_{mc} = \frac{a_{m1}^{(1)}}{P_1} - \frac{a_{m1}^{(2)}}{P} + a_{m2}^{(1)} - a_{m2}^{(2)}.$$

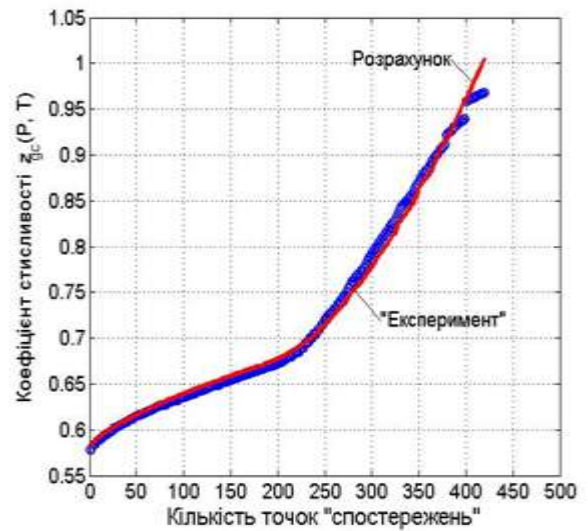


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта стисливості газу від тиску P і температури T

Приймаємо [7]: $z = 0,2$; хімічний склад газу, який поступає на низькотемпературну сепарацію, запозичений з роботи [16], користуючись цими даними, визначили молярну масу газу за формулою:

$$q_M = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{n_M} \mu_{q,i} v_{q,i},$$

де $\mu_{q,i}$ - мольна маса i -го компонента газу, кг/кмоль; $v_{q,i}$ - об'ємні доли компонентів газу, %.

Після обчислень отримали: $q_M = 20.0221 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$. Густина природного газу за нормальних фізичних умов буде такою [17]:

$$\rho_0 = \frac{q_M}{22,4}.$$

З врахуванням отриманого значення q_M

знаходимо, що $\rho_0 = 0.8325 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Густина

газу для умов сепарації обчислимо за формулою [7]:

$$\rho_g = \rho_0 \frac{273P}{0,1013 \cdot (273+T)},$$

де P - тиск газу в сепараторі, МПа; T - температура газу в сепараторі, °С. Враховуючи значення P і T , отримаємо:

$$\rho_g = 47.1871 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Витрату газу, який покидає сепаратор, визначимо як різницю між загальною витратою m і витратою конденсату m_{con} , тобто $m_g = m - m_{con}$. З врахуванням значень m і m_{con} отримали:

$$m_g = 1.2202 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Визначаємо кількість молів газу (за секунду), що поступили на сепарацію

$$M = \frac{m}{q_M}.$$

Після підстановки числових значень m і q_M в останню формулу отримали:

$$M = 0.1177 \frac{\text{кмоль}}{\text{с}}.$$

Кількість молів газу, які утворились у результаті сепарації: $M_g = \frac{m_g}{q_M}$. Оскільки

відомі числові значення m_g і q_M , то:
 $M_g = 0.0609 \frac{\text{кмоль}}{\text{с}}$. Із формули (3.9)

$$\text{знаходимо: } f_d = 1 - \frac{M_g}{M}.$$

За відомими значеннями M_g і M отримали такий результат:

$$f_d = 0.4824.$$

Формулу (39) можна записати і для масової витрати m газової суміші:

$$M = m \sum_{i=1}^{N_c} \frac{\eta_i}{\mu_{w,i}},$$

де M - кількість молів газу за секунду. З останнього рівняння визначимо

$$\sum_{i=1}^{N_c} \frac{\eta_i}{\mu_{w,i}} = \frac{M}{m}.$$

Після підстановки відповідних значень в останню формулу, отримаємо

$$q_f = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{\eta_i}{\mu_{w,i}} = 0.0499 \frac{\text{кмоль}}{\text{кг}}.$$

Газовий конденсат – це рідина, яка виділена із природного газу в процесі низькотемпературної сепарації, і є сумішшю вуглеводнів, які містять більше 4 атомів вуглецю.

У роботі [7] було зроблено припущення, що суміш газів і конденсату підпорядковуються законам ідеальних розчинів. Тому

$$\frac{f_i}{P} = 1. \quad (22)$$

Сепараторі С-2 (рис. 1) знаходиться під тиском 5,3 МПа, за такого тиску поведінка газу відрізняється від ідеального. Тому співвідношення (43а) не виконується. Фугітивність f_i є функцією тиску P і температури T . Оскільки температура в сепараторі підтримується постійною, то фугітивність f_i буде залежати лише від тиску P в сепараторі С-2. Така залежність є емпіричною і для тисків в діапазоні від 1 МПа до 20 МПа вона апроксимована [14] таким виразом:

$$f(P) = P \exp(-\alpha_p + \varphi_p(P)), \quad (23)$$

$$\text{де } \alpha_p = A_1 P_{np} + \frac{1}{2} A_2 P_{np}^2;$$

$$\varphi_p(P) = (A_0 - 1) \ln \frac{P}{P_{np}} + A_1 P + \frac{1}{2} A_2 P^2;$$

P_{np} - тиск, при якому стан газу можна уважати ідеальним ($P_{np} = 1 \text{ МПа}$). Для температури в сепараторі С-2 $T_0 = 252 \text{ }^\circ\text{K}$ ($T_0 = -21 \text{ }^\circ\text{C}$), отримані такі значення коефіцієнтів, що входять у формулу (23):

Коефіцієнти фугітивності:

$$A_0 = 1.0333e+00;$$

$$A_1 = -5.3874e-02;$$

$$A_2 = 1.7699e-03.$$

Враховуючи зроблене припущення, формула для визначення ε_{lq} , отримає такий вигляд:

$$\varepsilon_{lq}(P, P_1) = \theta(P, P_1) \left(f_d \sum_{j=1}^{N_c} \frac{\eta_j}{\mu_{w,j}} \times \sum_{i=1}^{N_{con}} \frac{\mu_{0i,s} \mu_{w,i}}{f_d + (1-f_d) \gamma(P)} + \frac{\Delta b_{mc}(z+1)}{\rho_{mix}} \right), \quad (24)$$

де $\gamma(P) = \frac{f_i}{P}$ - коефіцієнт фугітивності.

Із формули (23) випливає, що

$$\gamma(P) = \exp(-\alpha_p + \varphi_p(P)).$$

Уведемо таке позначення:

$$S_\mu = \sum_{i=1}^{N_{con}} \mu_{0i,s} \mu_{w,i}, \quad q_f = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{\eta_i}{\mu_{w,i}}.$$

Тоді формула (24) набуде такого вигляду:

$$\varepsilon_{lq}(P, P_1) = \theta(P, P_1) \left(\frac{f_d q_f S_\mu}{f_d + (1-f_d)\gamma(P)} + \frac{10^{-3} \Delta b_{mc}(z+1)}{\rho_{mix}} \right). \quad (25)$$

Після зроблених обчислень [7] отримали такі значення:

$$S_\mu = 78,862 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}, \quad q_f = 0.0499 \frac{\text{кмоль}}{\text{кг}}.$$

Оскільки вологовміст, який обчислюють за формулою Бюкачека, має розмірність г/м^3 , то для узгодження розмірності вологовмісту b_{mc} з розмірністю густини ρ_{mix} в формулу (25) уведений множник 10^{-3} . Тоді вологовміст буде мати розмірність кг/м^3 .

Аналогічну формулу отримаємо і для визначення коефіцієнта сепарації газу [14]:

$$\varepsilon_g(P, P_1) = \theta(P, P_1) \times \left(\frac{(1-f_d)q_f S_\mu}{f_d + (1-f_d)\gamma(P)} + \frac{10^{-3} b_{mc,2}(z+1)}{\rho_{mix}} \right). \quad (26)$$

Тепер перейдемо до визначення числових значень параметрів моделей динаміки процесу сепарації.

Рівняння (4) запишемо для усталеного режиму (верхні індекси «0» позначають значення величин в усталеному режимі).

Маємо: $\alpha \sqrt{K_g (P_1^{(0)} - P^{(0)}) P_1^{(0)}} = m$. Із останнього рівняння знаходимо:

$$\alpha_K = \frac{m}{\sqrt{(P_1^{(0)} - P^{(0)}) P_1^{(0)}}},$$

де $\alpha_K = \alpha K_g^{1/2}$.

З врахуванням числових значень відповідних величин, будемо мати:

$$\alpha_K = 0.1906 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{МПа}}.$$

Статичні характеристики регулюючих органів $\alpha_i(U_i)$, $i=1, 2$ апроксимуємо лінійними залежностями $\alpha_i(U_i) \approx \alpha_{U,i} U_i$, $i=1, 2$. Формулу (6) і (13) запишемо для усталеного режиму

$$m_{g2} = \alpha_1(U_1^{(0)}) K_g^{1/2} \sqrt{(P^{(0)} - P_2^{(0)}) P^{(0)}}, \quad (27)$$

$$m_{c2} = \alpha_2(U_2^{(0)}) \sqrt{g \rho_{lp} H^{(0)} + P^{(0)} - P_3}. \quad (28)$$

Із рівняння (27) знаходимо

$$\alpha_G = \alpha_1(U_1^{(0)}) K_g^{1/2} = \frac{m_{g2}}{\sqrt{(P^{(0)} - P_2^{(0)}) P^{(0)}}}.$$

Допускаємо, що $U_1^{(0)} = 0,06 \text{ МПа}$.

Беручи до уваги лінійну залежність статичної характеристики регулюючого органу, отримаємо таке рівняння:

$$\alpha_G = \alpha_{U,1} U_1^{(0)}. \quad \text{Звідси знаходимо}$$

$$\alpha_{U,1} = \frac{\alpha_G}{U_1^{(0)}}. \quad \text{З врахуванням відповідних}$$

числових значень будемо мати:

$$\alpha_{U,1} = 4.3626 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot (\text{МПа})^2}.$$

Рівняння (3.24) розв'яжемо відносно

$$\alpha_{con} = \alpha_2(U_2^{(0)}) = \frac{m_{c2}}{\sqrt{g \rho_{lp} H^{(0)} + P^{(0)} - P_3}}.$$

Оскільки $\alpha_{con} = \alpha_{U,2} U_2^{(0)}$, то

$$\alpha_{U,2} = \frac{\alpha_{con}}{U_2^{(0)}}. \quad \text{Приймаємо:}$$

$$U_1^{(0)} = U_2^{(0)} = 0,06 \text{ МПа}.$$

Густина конденсату є такою [14]:

$$\rho_{lp} = 743,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Після врахування відповідних числових значень отримали такий

$$\text{результат: } \alpha_{U,2} = 8.2005 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot (\text{МПа})^2}.$$

Тепер знайдемо числове значення γ_g , яке обчислюється за такою формулою:

$$\gamma_g = \frac{R_g T_0}{V_0}.$$

Оскільки ємність має циліндричну форму, то $V_0 = \pi r_s^2 L_s$, де $L_s = 3,18$ м. Отже, $\gamma_g = 40,5455$ 1/(м·с²).

Після зроблених припущень і введених позначень математична модель динаміки процесу низькотемпературної сепарації буде такою:

$$\begin{aligned} \frac{dH}{dt} &= \frac{1}{V_0 \rho_{lp} q_p(H)} (\alpha \varepsilon_{lq}(P, P_1) \times \\ &\times \sqrt{K_g (P_1 - P) P_1 - \alpha_2 (U_2) \sqrt{g \rho_{lp} H + P - P_3}}); \\ \frac{dP}{dt} &= \frac{z_{gc}^2(P)}{(1 - v(H))(z_{gc}(P) - \zeta(P))} \times \\ &\times \gamma_g (\alpha \varepsilon_g(P, P_1) \sqrt{K_g (P_1 - P) P_1} - \\ &- \alpha_1 (U_1) \sqrt{K_g (P - P_2) P}) + \\ &+ \frac{P}{z_{gc}(P) V_0 \rho_{lp}} (\alpha \varepsilon_{lq}(P, P_1) \sqrt{K_g (P_1 - P) P_1} - \\ &- \alpha_2 (U_2) \sqrt{g \rho_{lp} H + P - P_3}), \end{aligned} \quad (30)$$

де $\varepsilon_{lq}(P, P_1)$ і $\varepsilon_g(P, P_1)$ слід обчислювати за формулами (24) і (25).

Математичні моделі (29) і (30) лінеаризували відносно ustalених значень $H^{(0)}$, $P^{(0)}$, $P_1^{(0)}$, $P_2^{(0)}$, $U_1^{(0)}$ і $U_2^{(0)}$. Для цього скористались програмою, яка створена в середовищі MatLab. Після обчислень отримали такий результат:

ПАРАМЕТРИ ЛІНЕАРИЗОВАНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Елементи матриці А

a11=3.2699e-02 a12=-1.0706e-01

a21=2.8212e+03 a22=-3.1898e+03

Елементи матриці В

b11=0.0000e+00 b12=1.3088e+00

b21=-9.0573e+02 b22=2.8545e+00

Елементи матриці Gamma

gm11=1.9656e-02 gm12=0.0000e+00

gm21=5.1126e+02 gm22=6.6273e+00

Знайдемо матричні передавальні функції процесу низькотемпературної сепарації. Для цього перетворимо

лінеаризовану математичну модель (22) і (23) за Лапласом при нульових початкових умовах. Отже,

$$\bar{Y}(p) = C(Ip - A)^{-1} (B\bar{U}(p) + \Gamma\bar{\omega}(p)). \quad (31)$$

Аналіз виразу (31) показує, що динамічні властивості сепаратора, як об'єкта автоматичного керування, характеризується двома матричними передавальними функціями: відносно вектору керуючих дій

$$W_{yu}(p) = C(Ip - A)^{-1} B \quad (32)$$

і відносно вектору збурень

$$W_{y\omega}(p) = C(Ip - A)^{-1} \Gamma. \quad (33)$$

З врахуванням отриманих матричних передавальних функцій $W_{yu}(p)$ і $W_{y\omega}(p)$, рівняння (31) набуде такого вигляду:

$$\bar{Y}(p) = W_{yu}(p)\bar{U}(p) + W_{y\omega}(p)\bar{\omega}(p). \quad (34)$$

На основі матричного рівняння (34) синтезована структурна схема процесу НТС, як об'єкта автоматичного керування (рис. 3).

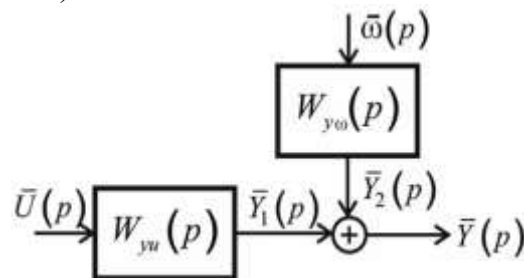


Рисунок 3 – Структурна схема процесу НТС як об'єкта автоматичного керування

Враховуючи, що C – одинична матриця, із матричного рівняння (33) знаходимо елементи матриці $W_{yu}(p)$, які визначають передавальні функції за каналами передачі « j – тий керуючий вплив – i – тий вихід».

$$w_{11}(p) = \frac{b_{11}p + a_{12}b_{21} - a_{22}b_{11}}{\Delta(p)},$$

$$w_{12}(p) = \frac{b_{12}p + a_{12}b_{22} - a_{22}b_{12}}{\Delta(p)},$$

$$w_{21}(p) = \frac{b_{21}p + a_{21}b_{11} - a_{11}b_{21}}{\Delta(p)},$$

$$w_{22}(p) = \frac{b_{22}p + a_{21}b_{12} - a_{11}b_{22}}{\Delta(p)},$$

де $\Delta(p) = w_{11}(p)w_{22}(p) - w_{12}(p)w_{21}(p)$;
 b_{ij} - елементи матриці B розміром 2×2 .

Аналогічні співвідношення отримані і для передавальних функцій $W_{y\omega}(p)$ за збуренням:

$$w_{11}^{(\omega)}(p) = \frac{\gamma_{11}p + a_{12}\gamma_{21} - a_{22}\gamma_{11}}{\Delta(p)},$$

$$w_{12}^{(\omega)}(p) = \frac{\gamma_{12}p + a_{12}\gamma_{22} - a_{22}\gamma_{12}}{\Delta(p)},$$

$$w_{21}^{(\omega)}(p) = \frac{\gamma_{21}p + a_{21}\gamma_{11} - a_{11}\gamma_{21}}{\Delta(p)},$$

$$w_{22}^{(\omega)}(p) = \frac{\gamma_{22}p + a_{21}\gamma_{12} - a_{11}\gamma_{22}}{\Delta(p)},$$

де γ_{ij} - елементи матриці Γ розміром 2×2 .

За знайденими передавальними функціями $w_{ij}(p)$, $i, j = 1, 2$ визначимо значення вихідних величин сепаратора відносно керуючих дій

$$Y_1^{(1)}(p) = w_{11}(p)U_1(p) + w_{12}(p)U_2(p), \quad (35)$$

$$Y_2^{(1)}(p) = w_{21}(p)U_1(p) + w_{22}(p)U_2(p), \quad (36)$$

і відносно збурень

$$Y_1^{(2)}(p) = w_{11}^{(\omega)}(p)\omega_1(p) + w_{12}^{(\omega)}(p)\omega_2(p), \quad (37)$$

$$Y_2^{(2)}(p) = w_{21}^{(\omega)}(p)\omega_1(p) + w_{22}^{(\omega)}(p)\omega_2(p), \quad (38)$$

де $Y_i^{(1)}(p)$, $i = 1, 2$ - компоненти вектора $\bar{Y}_1(p)$; $Y_i^{(2)}(p)$, $i = 1, 2$ - компоненти вектора $\bar{Y}_2(p)$ (рис. 3).

З врахуванням числових даних отримані такі передавальні функції низькотемпературного сепаратора відносно керуючих впливів:

$$w_{11}(p) = \frac{96,97}{p^2 + 3190p + 197,7};$$

$$w_{12}(p) = \frac{-9,057p + 0,2962}{p^2 + 3190p + 197,7};$$

$$w_{21}(p) = \frac{0,0131p + 41,74}{p^2 + 3190p + 197,7};$$

$$w_{22}(p) = \frac{2,855p + 3692}{p^2 + 3190p + 197,7};$$

і відносно збурень:

$$w_{11}^{(\omega)}(p) = \frac{0,01966p + 7,963}{p^2 + 3190p + 197,7};$$

$$w_{12}^{(\omega)}(p) = 0; \quad w_{21}^{(\omega)}(p) = 0;$$

$$w_{22}^{(\omega)}(p) = \frac{6,627p - 0,2167}{p^2 + 3190p + 197,7}$$

Отримані результати обчислень свідчать, що матриця зовнішніх впливів (збурень) $W_{y\omega}(p)$ - діагональна. Тому рівняння (37) і (38) набудуть такого вигляду:

$$Y_1^{(2)}(p) = w_{11}^{(\omega)}(p)\omega_1(p),$$

$$Y_2^{(2)}(p) = w_{22}^{(\omega)}(p)\omega_2(p).$$

Отримані результати дають змогу із матричного рівняння (34) знайти вирази для виходів сепаратора

$$Y_1(p) = w_{11}(p)U_1(p) + w_{12}(p)U_2(p) + w_{11}^{(\omega)}(p)\omega_1(p), \quad (39)$$

$$Y_2(p) = w_{21}(p)U_1(p) + w_{22}(p)U_2(p) + w_{22}^{(\omega)}(p)\omega_2(p). \quad (40)$$

На основі рівнянь динаміки процесу (39) і (40) створено структурну схему сепаратора як об'єкта автоматичного керування (рис. 4). Із цієї схеми видно наявність перехресних зв'язків між входами та виходами, що погіршують якість керування процесом.

На рис. 5 зображено реакцію керованого об'єкта (сепаратор С-2) на стрибкоподібних вхідних впливах $U_1^{(0)} = U_2^{(0)} = 0,025 \text{ МПа}$, яка обчислена за формулами (35) і (36).

Аналіз отриманих результатів показує, що процес низькотемпературної сепарації як об'єкт автоматичного керування має властивості самовирівнювання та є аперіодичним. Час перехідного процесу для сигналів, поданих на перший і другий входи, не перевищує 100 с.

На рис. 5 зображена реакція керованого об'єкта (сепаратор С-2) на стрибкоподібних вхідних впливах $U_1^{(0)} = U_2^{(0)} = 0,025 \text{ МПа}$, яка обчислена за формулами (35) і (36).

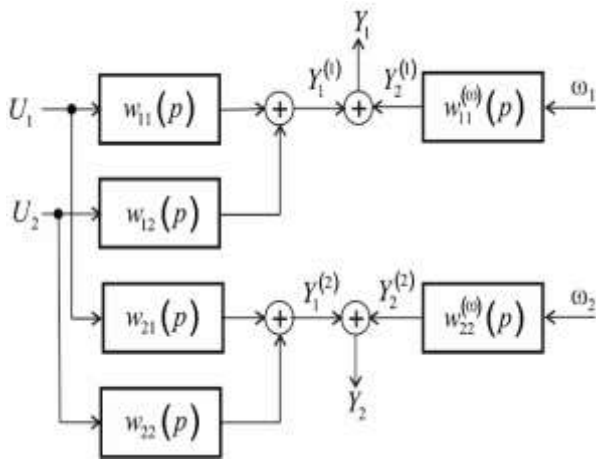
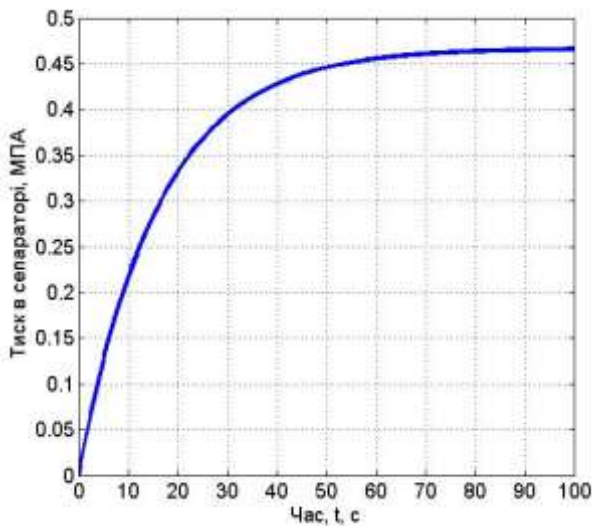
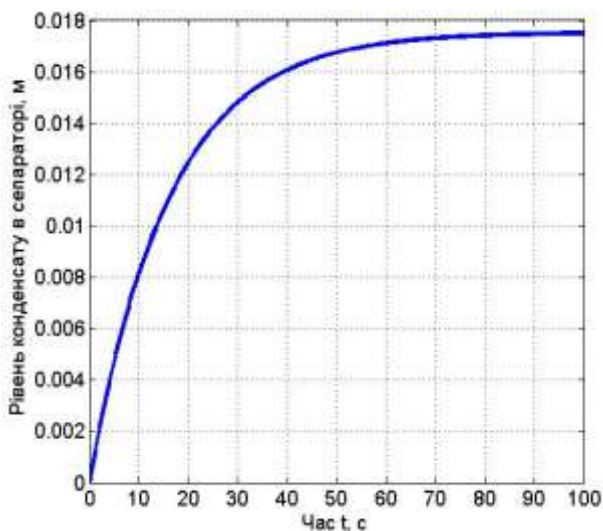


Рисунок 4 – Структурна схема низькотемпературного сепаратора



а



б

Рисунок 5 – Зміна тиску (а) і рівня конденсату (б) в сепараторі при стрибкоподібних вхідних впливах

Таким чином, сепаратор як об'єкт автоматичного керування належить до класу багатовимірних об'єктів з внутрішніми перехресними зв'язками, що ускладнює задачу автоматичного керування таким об'єктом. Тому задачею подальшого дослідження є синтез автономної системи керування, що дасть змогу компенсувати перехресні зв'язки й тим самим значно покращити якість процесу керування.

Висновки

1. На основі закону збереження кількості речовини створено математичну модель процесу низькотемпературної сепарації у термінах «вхід-вихід» з врахуванням реальних умов протікання процесу НТС, яка є придатною для цілей керування.

2. Виконана лінеаризація математичної моделі процесу низькотемпературної сепарації за умови, що вихідні величини незначно відхиляються від усталених значень, що дало змогу отримати передавальні функції керованого об'єкта і на основі їх аналізу виявлено наявність перехресних зав'язків між вхідними та вихідними величинами, що є основою для синтезу автоматичної системи керування процесом низькотемпературної сепарації.

Список використаних джерел

1. Szilas A. P. Production and Transport of Oil and Gas. Akademiai Kiado. Budapest, 1975. 264 p.

2. Abdel-Aal H. K., Mohamed Aggour, Fahim M. A. Petroleum and Gas Field Processing. Marcel Dekker, INC. New York Basel. 358 p.

3. Савченко О.О., Балінський О.С. Нагрівання природного газу за допомогою енергетичного роздільника на діючій газорозподільній станції. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/35d71acb-c02b-487f-860a-28eb2f95134b/content>

4. Кондрат О.Р., Гутак А.Д. Енергоефективна модифікація установки

низькотемпературної сепарації газу. *Нафтогазова галузь України*. 2015. № 5. С. 26–30.

5. Poling Bruce E., Prausnitz John M., O'Connell John P. *The Properties of Gases and Liquids*. McGraw Hill Professional. 2000. 768 p.

6. Горбійчук М. І., Кулинин Н. Л. Математична модель процесу низькотемпературної сепарації. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2006. № 1 (13). С. 88-92.

7. Horbiychuk M.I., Yednak I.S., Skrypka O.A. Mathematical modelling of the low-temperature separation process. *Modern engineering and innovative technologies*. Vol. 27. Part 1. June 2023. Pp. 101–121. URL: <https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit27-01/meit27-01>

8. Горбійчук М. І. Моделювання об'єктів і систем керування в нафтовій і газовій промисловості: навч. посібник. Частина 2. Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 1999. 226 с.

9. Астрелін І.М., Запольський А.К., Супрунчук В.І., Прокоф'єва В.М. Теорія процесів виробництв неорганічних речовин: навч. посібник. К.: Вища школа. 1992. 399 с.

10. Горбійчук М.І., Поварчук Д.Д. Математична модель системи керування процесом двоступеневої сепарації нафти. *Методи та прилади контролю якості*. 2017. № 2 (39). С. 107–116.

11. Каменська Т.А., Рудницька Г.А., Пономарьов М.Є. Фізична хімія. Хімічна термодинаміка: навч. посібник. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2021. 257 с.

12. Кропивницький Д.Р., Горбійчук М. І. Побудова математичної моделі бурового насосного агрегату для автоматичної системи керування тиском на його виході. *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. 2023. № 1 (50). С. 48–59.

13. Компресорні станції. Контроль теплотехнічних та екологічних характеристик газоперекачувальних агрегатів: СОУ 60.03-30019801-011:2004.

Офіц. вид. К.: ДК «Укртрансгаз». 2004. 117 с.

14. Горбійчук М.І., Єднак І.С. Математична модель статичного режиму процесу низькотемпературної сепарації.

15. Himmelblau D. M. *Process Analysis by Statistical Methods*. John Wiley and Sons, Inc. New York, London, Sydney, Toronto. 1970. 947 p. URL: <https://dokumen.tips/documents/process-analysis-by-statistical-methods-d-himmelblau.html?page=66> [in Ukrainian].

16. Ляпощенко О. О. Теоретичні основи процесів інерційно-фільтруючої сепарації: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08. Суми, 2016. 435 с.

17. Сусак О. М., Касперович В. К., Андріішин М. П. Трубопровідний транспорт газу: підручник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. 345 с.

References

1. Szilas A. R. *Production and Transport of Oil and Gas*. Akademiai Kiado. Budapest, 1975. 264 p.

2. Abdel-Aal H. K., Mohamed Aggour, Fahim M. A. *Petroleum and Gas Field Processing*. Marcel Dekker, INC. New York Basel. 358 p.

3. Savchenko O.O., Balinskyi O.S. *Nahrivannia pryrodnoho hazu za dopomohoiu enerhetychnoho rozdilnyka na diiuchii hazorozpodilnii stantsii*. URL: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/35d71acb-c02b-487f-860a-28eb2f95134b/content> [in Ukrainian]

4. Kondrat O.R., Hutak A.D. *Enerhoefektyvna modyfikatsiia ustanovky nyzkotemperaturnoi separatsii hazu. Naftohazova haluz Ukrainy*. 2015. No 5. P. 26–30. [in Ukrainian]

5. Poling Bruce E., Prausnitz John M., O'Connell John P. *The Properties of Gases and Liquids*. McGraw Hill Professional. 2000. 768 p.

6. Horbiichuk M. I., Kulynyn N. L. *Matematychna model protsesu nyzkotemperaturnoi separatsii. Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho*

tekhnichnoho universytetu nafty i hazu. 2006. No 1 (13). P. 88-92. [in Ukrainian]

7. Horbiychuk M.I., Yednak I.S., Skrypka O.A. Mathematical modelling of the low-temperature separation process. *Modern engineering and innovative technologies*. Vol. 27. Part 1. June 2023. P. 101–121. URL: <https://www.modern techno.de/index.php/meit/issue/view/meit27-01/meit27-01>

8. Horbiichuk M. I. Modeliuvannia obektiv i system keruvannia v naftovii i hazovii promyslovosti: navch. posibnyk. Chastyna 2. Ivano-Frankivsk: IFDTUNH. 1999. 226 p. [in Ukrainian]

9. Astrelin I.M., Zapolskyi A.K., Suprunchuk V.I., Prokofieva V.M. Teoriia protsesiv vyrobnytstv neorhanichnykh rehovyn: navch. posibnyk. K.: Vyscha shkola. 1992. 399 p.

10. Horbiichuk M.I., Povarchuk D.D. Matematychna model systemy keruvannia protsesom dvostupenevoi separatsii nafty. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2017. No 2 (39). P. 107–116. [in Ukrainian]

11. Kamenska T.A., Rudnytska H.A., Ponomarov M.Ie. Fizychna khimii. Khimichna termodynamika: navch. posibnyk. K.: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 2021. 257 p. [in Ukrainian]

12. Kropyvnytskyi D.R., Horbiichuk M. I. Pobudova matematychnoi modeli burovoho nasosnoho ahrehatu dlia avtomatychnoi systemy keruvannia tyskom na yoho vykhodi. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH. 2023. No 1 (50). P. 48–59. [in Ukrainian]

13. Kompresorni stantsii. Kontrol teplotekhnichnykh ta ekolohichnykh kharakterystyk hazoperekachuvalnykh ahrehativ: SOU 60.03-30019801-011:2004. Ofits. vyd. K.: DK «Ukrtranshaz». 2004. 117 p. [in Ukrainian]

14. Horbiichuk M.I., Yednak I.S. Mathematical Model Of The Static Mode Of The Low-temperature Separation Process. URL - <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2024-29-00-023>

15. Himmelblau D. M. Process Analysis by Statistical Methods. John Wiley and Sons, Inc. New York, London, Sydney, Toronto. 1970. 947 p. URL:

<https://dokument.tips/documents/process-analysis-by-statistical-methods-d-himmelblau.html?page=66> [in Ukrainian].

16. Liaposhchenko O. O. Teoretychni osnovy protsesiv inertsiiino-filtruiuchoi separatsii: dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.17.08. Sumy. 2016. 435 p. [in Ukrainian]

17. Susak O. M., Kasperovych V. K., Andriishyn M. P. Truboprovodnyi transport hazu: pidruchnyk. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH. 2013. 345 p. [in Ukrainian]

MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMIC PROCESS OF LOW-TEMPERATURE SEPARATION

M. I. Horbiychuk, I. S. Yednak

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019, e-mail: ihor4698@gmail.com

УДК 517.98

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-89-93

СЛАБКΟΣИΜΕΤΡΙЧНІ ЛІНІЙНІ НЕПЕРЕРВНІ ФУНКЦІОНАЛИ НА ПРОСТОРІ АБСОЛЮТНО СУМОВНИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ

Т. В. Васи́лишин

*Прикарпатський національний університет імені Васи́ля Стефаника;
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна; e-mail: taras.vasylyshyn@pnu.edu.ua*

Роботу присвячено вивченню слабкосиметричних неперервних лінійних функціоналів на комплексному банаховому просторі ℓ_1 всіх абсолютно сумовних послідовностей комплексних чисел. У загальному випадку, функцію на векторному просторі називають симетричною відносно деякої фіксованої групи операторів на цьому просторі, якщо дана функція є інваріантною відносно дії на її аргумент елементів групи. Функцію на векторному просторі називають слабко симетричною відносно деякої фіксованої спадної за включенням послідовності груп операторів на цьому просторі, якщо ця функція є симетричною відносно принаймні однієї з груп, що належать до послідовності. Простори симетричних неперервних поліномів і, зокрема, простори симетричних неперервних лінійних функціоналів на банахових просторах є повними відносно норми рівномірної збіжності на замкнутій одиничній кулі, яка є однією з найчастіше використовуваних норм на цих просторах. На відміну від цього випадку, простори слабко симетричних неперервних поліномів на банахових просторах відносно згаданої вище норми не обов'язково є повними. Отже, поповнення цих просторів можуть містити функції, які не задовольняють жодним умовам симетрії. Відповідно, такі функції можна апроксимувати слабкосиметричними функціями, кожна з яких за визначенням є симетричною відносно однієї з вищезгаданих груп. Це дозволяє застосовувати до просторів, загалом, несиметричних функцій методику, розроблену для просторів симетричних функцій. У цій роботі побудовано послідовність груп симетрій на просторі ℓ_1 . Отримано структуру слабкосиметричних відносно цієї послідовності неперервних лінійних функціоналів на даному просторі. Знайдено поповнення простору всіх таких функціоналів і описано деякі властивості даного поповнення.

Ключові слова: симетричний функціонал, слабко симетричний функціонал, банахів простір абсолютно сумовних послідовностей.

The work is devoted to the study of weakly symmetric continuous linear functionals on the complex Banach space ℓ_1 of all absolutely summing complex sequences. In general, a function on a vector space is called symmetric with respect to some fixed group of operators on this space if the function is invariant under the action on its argument of elements of the group. A function on a vector space is called weakly symmetric with respect to some fixed descending by inclusion sequence of groups of operators on this space if this function is symmetric with respect to at least one of the groups that belong to the sequence. Spaces of symmetric continuous polynomials and, in particular, spaces of symmetric continuous linear functionals, on Banach spaces are complete with respect to the norm of the uniform convergence on the closed unit ball, which is one of the most commonly used norms on these spaces. In contrast, spaces of weakly symmetric continuous polynomials on Banach spaces with respect to the above-mentioned norm are not necessarily complete. Therefore, completions of these spaces can contain functions that do not satisfy any conditions of symmetry. Consequently, such functions can be approximated by weakly symmetric functions each of which, by the definition, is symmetric with respect to one of the above-mentioned groups. This fact makes it possible to apply to spaces of, in general, non-symmetric functions the technique developed for spaces of symmetric functions. In this work, we construct the sequence of groups of symmetries on the space ℓ_1 . We obtain the structure of weakly symmetric, with respect to this sequence, continuous linear functionals on this space. Also, we find the completion of the space of all such functionals. Some properties of the completion are established.

Keywords: symmetric functional, weakly symmetric functional, Banach space of absolutely summing sequences.

Вступ

Симетричні поліноми на нескінченно-вимірних просторах вперше було розглянуто в роботі [5], де, зокрема, було побудовано алгебраїчні бази алгебр

неперервних симетричних поліномів на банахових просторах сумовних послідовностей. Результати цієї роботи було узагальнено в роботі [4] на банахові простори із симетричним базисом.

Спектри алгебр цілих симетричних функцій почали досліджуватися в роботі [1]. Повний опис спектра алгебри Фреше всіх цілих симетричних функцій обмеженого типу на просторі абсолютно сумовних функцій отримано в роботі [3]. Найбільш загальний підхід до вивчення симетричних функцій на банахових просторах отримано в роботі [2], згідно із яким фіксують певну групу операторів на банаховому просторі й симетричними відносно цієї групи вважають функції на просторі, що є інваріантними відносно дії елементів групи на їхній аргумент. В роботі [6] використано цей підхід і побудовано групи операторів на банахових просторах абсолютно сумовних послідовностей, які є слабшими від класичної групи перестановок базисних елементів. Алгебри неперервних симетричних відносно цих груп поліномів мають ряд властивостей, аналогічних до властивостей алгебр симетричних у класичному сенсі поліномів. Зокрема, мають злічені алгебраїчні базиси. Крім того, із цих груп можна формувати впорядковані за включенням злічені ланцюги. Це дозволяє будувати індуктивні границі відповідних алгебр симетричних поліномів і цілих симетричних функцій. Найпростішим нетривіальним випадком полінома на банаховому просторі є лінійний функціонал. У даній роботі розглянуто лінійні неперервні симетричні відносно згаданих вище груп функціонали на комплексному банаховому просторі абсолютно сумовних послідовностей, введено поняття слабо симетричної функції та описано замикання множини всіх слабо симетричних неперервних лінійних функціоналів на цьому просторі.

Висвітлення основного матеріалу статті

Нехай $\ell_{1,T}$ це банахів простір всіх абсолютно сумовних послідовностей комплексних чисел із нормою

$$\|x\|_1 = \sum_{m=1}^{\infty} |x_m|,$$

де $x = (x_1, x_2, \dots) \in \ell_1$.

Нехай

$$e_m = (\underbrace{0, \dots, 0}_{m-1}, 1, 0, \dots)$$

для $m \in \mathbb{N}$.

Відомо, що множина $\{e_m\}_{m=1}^{\infty}$ є базисом Шаудера простору ℓ_1 . Також відомо, що відображення

$$f \in \ell_1^* \mapsto (f(e_1), f(e_2), \dots) \in \ell_{\infty}$$

є ізометричним ізоморфізмом, де ℓ_1^* є банаховим простором всіх лінійних неперервних функціоналів на просторі ℓ_1 і ℓ_{∞} є банаховим простором всіх обмежених послідовностей комплексних чисел із нормою

$$\|x\|_{\infty} = \sup_{m \in \mathbb{N}} |x_m|,$$

де $x = (x_1, x_2, \dots) \in \ell_{\infty}$.

Для кожних $f \in \ell_1^*$ та $x = (x_1, x_2, \dots) \in \ell_1$, за неперервністю і лінійністю функціонала f ,

$$f(x) = \sum_{m=1}^{\infty} x_m f(e_m).$$

Нехай G є довільною фіксованою групою операторів на просторі ℓ_1 . Функцію $f: \ell_1 \rightarrow \mathbb{C}$ називають G -симетричною, якщо $f(g(x)) = f(x)$ для всіх $x \in \ell_1$ і $g \in G$. Найбільш вживаними є групи операторів, які переставляють елементи базису простору ℓ_1 . Розглянемо загальний метод побудови таких груп. Нехай B є довільною групою бієкцій на множині \mathbb{N} . Для $b \in B$ визначимо оператор $g_b: \ell_1 \rightarrow \ell_1$ формулою

$$g_b((x_1, x_2, \dots)) = (x_{b(1)}, x_{b(2)}, \dots).$$

Нехай

$$G_B = \{g_b : b \in B\}.$$

Розглянемо конкретну реалізацію груп B та G_B .

Нехай $n \in \mathbb{N}$. с $\pi_n: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \times \{1, \dots, n\}$ наступним чином. Нехай $m \in \mathbb{N}$. Тоді

існують єдині $j \in \mathbb{N}$ і $s \in \{1, \dots, n\}$ такі, що $m = (j-1)n + s$. Покладемо

$$\varkappa_n(m) = (j, s).$$

Нехай \mathcal{S} це група всіх бієкцій на множині \mathbb{N} . Нехай $\text{id}_{\{1, \dots, n\}}$ є тотожним відображенням на множині $\{1, \dots, n\}$. Для $\sigma \in \mathcal{S}$ нехай $\sigma \times \text{id}_{\{1, \dots, n\}}$ є бієкцією, яка діє на множині $\mathbb{N} \times \{1, \dots, n\}$ і визначена формулою

$$(\sigma \times \text{id}_{\{1, \dots, n\}})((j, s)) = (\sigma(j), s),$$

де $(j, s) \in \mathbb{N} \times \{1, \dots, n\}$. Для $\sigma \in \mathcal{S}$ визначимо бієкцію $\theta_{\sigma, n} : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ формулою

$$\theta_{\sigma, n} = \varkappa_n^{-1} \circ (\sigma \times \text{id}_{\{1, \dots, n\}}) \circ \varkappa_n,$$

Нехай

$$\Theta_n = \{\theta_{\sigma, n} : \sigma \in \mathcal{S}\}.$$

Зауважимо, що множина Θ_n є підгрупою групи \mathcal{S} . Згідно із [1, теорема 4 і лема 7], кожен лінійний неперервний G_{Θ_n} -симетричний функціонал f на просторі ℓ_1 можна єдиним чином зобразити у вигляді лінійної комбінації функціоналів

$$f_s((x_1, x_2, \dots)) = x_s + x_{n+s} + x_{2n+s} + \dots,$$

де $s \in \{1, \dots, n\}$.

Оскільки кожному функціоналу f_s відповідає періодична з періодом n послідовність у просторі ℓ_∞ , то і довільній лінійній комбінації таких функціоналів відповідає періодична з періодом n послідовність у просторі ℓ_∞ . Навпаки теж правильно. Тому можна ототожнити множину всіх таких послідовностей із множиною всіх лінійних неперервних G_{Θ_n} -симетричних функціоналів на просторі ℓ_1 .

Розглянемо методику наближення, у загальному випадку, несиметричних функцій симетричними функціями відносно різних груп симетрії. Функцію $f : \ell_1 \rightarrow \mathbb{C}$ назвемо слабо симетричною, якщо існує $n \in \mathbb{N}$ таке, що ця функція є

$G_{\Theta_{2^n}}$ -симетричною. Зауважимо, що у ролі степенів числа 2 можна використати степені довільного натурального числа, більшого від 1. На відміну від просторів симетричних функцій, простори слабо симетричних функцій, у загальному випадку, не є замкненими. Це означає, що у замиканнях таких просторів можуть міститися функції, для яких не виконуються жодні умови симетрії. Відповідно, ці функції можуть бути наближеними слабо симетричними функціями. Розглянемо слабо симетричні лінійні неперервні функціонали на просторі ℓ_1 . Згідно із зауваженням вище стосовно структури лінійних неперервних G_{Θ_n} -симетричних функціоналів на просторі ℓ_1 , простір слабо симетричних лінійних неперервних функціоналів на цьому просторі можна ототожнити із підпростором простору ℓ_∞ , який складається зі всіх періодичних послідовностей, періодами яких є степені числа 2. Побудуємо множину, яка є замиканням даного простору і доведемо деякі її властивості.

Нехай Y це множина всіх послідовностей $y = (y_1, y_2, \dots) \in \ell_\infty$, які мають наступну властивість: для кожного $\varepsilon > 0$ існує $n \in \mathbb{N}$ таке, що

$$|y_j - y_{j+k2^n}| < \varepsilon$$

для кожних $j \in \{1, \dots, 2^n\}$ і $k \in \mathbb{N}$.

Лема 1. Для кожних $y^{(1)}, y^{(2)} \in Y$, сума $y^{(1)} + y^{(2)}$ належить множині Y .

Доведення. Нехай $y^{(1)}, y^{(2)} \in Y$. Нехай $y = y^{(1)} + y^{(2)}$. Покажемо, що $y \in Y$. Нехай $\varepsilon > 0$. Оскільки $y^{(1)}, y^{(2)} \in Y$, то існують числа $n_1, n_2 \in \mathbb{N}$ такі, що

$$|y_j^{(s)} - y_{j+k2^{n_s}}^{(s)}| < \varepsilon/2$$

для кожних $s \in \{1, 2\}$, $j \in \{1, \dots, 2^{n_s}\}$ і $k \in \mathbb{N}$.

Нехай $n = \max\{n_1, n_2\}$. Покажемо, що $|y_j - y_{j+k2^n}| < \varepsilon$ для кожних $j \in \{1, \dots, 2^n\}$ і $k \in \mathbb{N}$. Нехай $j \in \{1, \dots, 2^n\}$ і $k \in \mathbb{N}$. Зауважимо, що

$$j+k2^n = j+k2^{n-n_s}2^{n_s} = j+k_s 2^{n_s},$$

де $k_s = k2^{n-n_s}$ для $s \in \{1, 2\}$. Як наслідок,

$$\left| y_j^{(s)} - y_{j+k2^n}^{(s)} \right| = \left| y_j^{(s)} - y_{j+k_s 2^{n_s}}^{(s)} \right| < \varepsilon/2$$

для кожного $s \in \{1, 2\}$. Тому

$$\begin{aligned} \left| y_j - y_{j+k2^n} \right| &= \left| y_j^{(1)} + y_j^{(2)} - y_{j+k2^n}^{(1)} - y_{j+k2^n}^{(2)} \right| = \\ &= \left| y_j^{(1)} - y_{j+k2^n}^{(1)} + y_j^{(2)} - y_{j+k2^n}^{(2)} \right| \leq \\ &\leq \left| y_j^{(1)} - y_{j+k2^n}^{(1)} \right| + \left| y_j^{(2)} - y_{j+k2^n}^{(2)} \right| < \end{aligned}$$

$$< \varepsilon/2 + \varepsilon/2 = \varepsilon.$$

Отже, $y \in Y$. Доведено.

Лема 2. Для кожних $\lambda \in \mathbb{C}$ і $y \in Y$, елемент λy належить множині Y .

Доведення. Якщо $\lambda = 0$, то $\lambda y = (0, 0, \dots)$ і, як наслідок, $\lambda y \in Y$. Розглянемо випадок $\lambda \neq 0$. Нехай $z = \lambda y$. Покажемо, що $z \in Y$. Нехай $\varepsilon > 0$. Оскільки $y \in Y$, то існує $n \in \mathbb{N}$ таке, що

$$\left| y_j - y_{j+k2^n} \right| < \varepsilon/|\lambda|$$

для кожних $j \in \{1, \dots, 2^{n_s}\}$ і $k \in \mathbb{N}$. Як наслідок,

$$\begin{aligned} \left| z_j - z_{j+k2^n} \right| &= \left| \lambda y_j - \lambda y_{j+k2^n} \right| = \\ &= \left| \lambda \right| \left| y_j - y_{j+k2^n} \right| < \left| \lambda \right| \frac{\varepsilon}{|\lambda|} = \varepsilon \end{aligned}$$

для кожних $j \in \{1, \dots, 2^{n_s}\}$ і $k \in \mathbb{N}$. Отже, $z \in Y$. Доведено.

Із лем 1 і 2 випливає наступний результат.

Твердження 1. Множина Y є лінійним підпростором простору ℓ_∞ .

Покажемо, що підпростір Y є замкненим в просторі ℓ_∞ .

Теорема 1. Простір Y є замкненим підпростором простору ℓ_∞ .

Доведення. Покажемо, що множина Y містить кожну свою точку дотику. Нехай $x \in \ell_\infty$ є точкою дотику для Y . Покажемо, що $x \in Y$. Нехай $\varepsilon > 0$. Оскільки x є точкою дотику множини Y , то існує точка $y \in Y$ така, що

$$\|x - y\|_\infty < \varepsilon/3.$$

Оскільки $y \in Y$, то існує $n \in \mathbb{N}$ таке, що

$$\left| y_j - y_{j+k2^n} \right| < \varepsilon/3$$

для кожних $j \in \{1, \dots, 2^n\}$ і $k \in \mathbb{N}$. Тоді

$$\begin{aligned} \left| x_j - x_{j+k2^n} \right| &= \left| x_j - y_j + y_j - y_{j+k2^n} + y_{j+k2^n} - \right. \\ &\quad \left. - x_{j+k2^n} \right| \leq \left| x_j - y_j \right| + \left| y_j - y_{j+k2^n} \right| + \left| y_{j+k2^n} - \right. \\ &\quad \left. - x_{j+k2^n} \right| < \varepsilon/3 + \varepsilon/3 + \varepsilon/3 = \varepsilon \end{aligned}$$

для кожних $j \in \{1, \dots, 2^n\}$ і $k \in \mathbb{N}$. Отже, $x \in Y$. Доведено.

Таким чином, простір Y є банаховим простором. Можна перекоонатися, що простір, який складається зі всіх періодичних послідовностей, періодами яких є степені числа 2, є скрізь щільним у просторі Y . Отже, простір Y є поповненням простору всіх слабо симетричних лінійних неперервних функціоналів на просторі ℓ_1 .

Висновки

1. Введено поняття слабо симетричного лінійного функціонала на просторі ℓ_1 .

2. Побудовано підпростір простору ℓ_∞ , який є замиканням простору слабо симетричних лінійних функціоналів на просторі ℓ_1 .

Список використаних джерел / References

1. Alencar R., Aron R., Galindo P., Zagorodnyuk A. Algebras of symmetric holomorphic functions on ℓ_p . *Bull. Lond. Math. Soc.* 2003. 35(2), pp. 55-64. DOI: [10.1112/S0024609302001431](https://doi.org/10.1112/S0024609302001431)
2. Aron R., Galindo P., Pinasco D., Zalduendo I. Group-symmetric holomorphic functions on a Banach space. *Bull. Lond. Math. Soc.* 2016. 48(5), pp. 779-796. DOI: [10.1112/blms/bdw043](https://doi.org/10.1112/blms/bdw043)
3. Chernega I., Galindo P., Zagorodnyuk A. On the spectrum of the algebra of bounded-type symmetric analytic functions on ℓ_1 . *Math. Nachr.* 2024. 297 (10), pp. 3835-3846. DOI: [10.1002/mana.202300415](https://doi.org/10.1002/mana.202300415)

4. Gonzalez M., Gonzalo R., Jaramillo J.A. Symmetric polynomials on rearrangement invariant function spaces. *J. Lond. Math. Soc.* 1999. 59(2), pp. 681-697. DOI: [10.1112/S0024610799007164](https://doi.org/10.1112/S0024610799007164)

5. Nemirovskii A. S., Semenov S. M. On polynomial approximation of functions on Hilbert space. *Mat. USSR Sbornik* 1973. 21(2), pp. 255-277. DOI: [10.1070/SM1973v021n02ABEH002016](https://doi.org/10.1070/SM1973v021n02ABEH002016)

6. Vasylyshyn T. Isomorphisms of algebras of symmetric functions on ℓ_p . *Mat. Stud.* (in print).

**WEAKLY SYMMETRIC LINEAR
CONTINUOUS FUNCTIONALS ON THE
SPACE OF ABSOLUTELY SUMMABLE
SEQUENCES**

T. V. Vasylyshyn

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
57 Shevchenka St., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine,
e-mail: taras.vasylyshyn@pnu.edu.ua

УДК 517.982

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-94-97

АПРОКСИМАЦІЯ ВУЗЬКИХ ОПЕРАТОРІВ НА ПРОСТОРИ L_1 ОПЕРАТОРАМИ З ОДНОВИМІРНИМ ОБРАЗОМ

М. М. Попов¹, О. Г. Фотій²

¹ Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна; e-mail: misham.popov@gmail.com

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича;
вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58012, Україна; e-mail: ofotiy@ukr.net

Замітка присвячена вивченню апроксимаційних властивостей вузьких операторів, заданих на просторі Лебега L_1 , що діють у довільний банахів простір. Нова властивість, яку ми досліджуємо, полягає в тому, що вузький оператор на "значній" частині області визначення є як завгодно близьким в розумінні операторної норми до оператора з одновимірним образом. "Значна" частина – це підпростір, який є ізометрично ізоморфним до L_1 , і на якому оператор "майже" досягає своєї норми. Це виглядає дещо несподіваним, адже серед вузьких операторів є ізоморфні вкладення, а на просторі L_p при $p > 1$ кожний лінійний обмежений оператор подається у вигляді суми двох вузьких операторів. Доведення основного результату використовує лему Розенталя про множину векторів простору L_1 , на яких лінійний обмежений оператор "майже" досягає своєї норми, а також техніку базисів Шаудера. Наприкінці ми наводимо приклади різного типу вузьких операторів та їх відповідних апроксимацій. Серед них строго вузький оператор, а саме оператор умовного математичного сподівання по відношенню до під- σ -алгебри множин $X^*[0,1]$, де X – довільна борелівська підмножина на $[0,1]$, який апроксимується за допомогою свого звуження. Неявно сформульовано відкриту задачу про конструктивну апроксимацію деякого компактного оператора з нескінченновимірними образами, що зображається у вигляді степеневого ряду за степенями двійки та системи Радемахера на відрізьку $[0,1]$, та обчислення норми якого обчислювально складна задача.

Ключові слова: простір Лебега, вузький оператор, компактний оператор, банахів простір.

The note is devoted to the study of further properties of narrow operators, defined on the Lebesgue space L_1 and acting to an arbitrary Banach space. We investigate a new property, which asserts that any narrow operator on an "essential" part of the domain space is arbitrary close in the sense of operator norm, to a rank one operator. "Essential" means a subspace, which is isometrically isomorphic to L_1 itself and on which the operator "almost" attains its norm. It looks somewhat strange, because there are isomorphic embeddings among narrow operators, and every linear bounded operator on the space L_p with $p > 1$ can be represented as a sum of two narrow operators. The proof of the main result uses Rosenthal's lemma on the set of vectors on the space L_1 , at which the operator "almost" attains its norm, and the Schauder bases technique. Finally we provide some examples of narrow operators with their corresponding approximations. Among these examples there is a strictly narrow operator, namely, the operator of conditional mathematical expectation with respect to the sub- σ -algebra of sets $X^*[0,1]$, where X is an arbitrary Borel subset of $[0,1]$, which is approximated by means of its restriction. There is an implicitly formulated open problem of constructive approximation of a certain compact operator with infinite-dimensional images, which is represented as a power series by the powers of two and the Rademacher system on the interval $[0,1]$, for which the evaluation of the norm is a computationally difficult problem.

Keywords: Lebesgue space, narrow operator, compact operator, Banach space.

Вступ

Вузькі оператори, які у певному сенсі узагальнюють компактні оператори, були введені та систематично досліджені у статті [1], і надалі активно досліджувалися у низці праць різних математиків (див. огляд [2] та монографію [3]). Серед вузьких операторів є «дуже» некомпактні оператори, якими є ізоморфні вкладення [3, Theorem 4.10] (більш того, на просторах

L_p при $1 < p < \infty$ кожний оператор $T: L_p \rightarrow L_p$ є сумою двох вузьких операторів [3, Theorem 5.2]). Незважаючи на це, у даній замітці ми показуємо, використовуючи специфіку простору Лебега L_1 , що кожний вузький оператор, що діє з L_1 у довільний банахів простір, з довільною точністю може бути апроксимованим на «великому» підпросторі області визначення L_1 певним оператором з одновимірним образом.

Наведемо необхідну інформацію. Лінійний неперервний оператор $T: L_1 \rightarrow X$, що діє з простору $L_1 = L_1[0,1]$ всіх класів еквівалентності сумовних дійснозначних вимірних функцій, визначених на відрізку $[0,1]$, у банахів простір X , називається вузьким, якщо для довільного $\varepsilon > 0$ та довільної вимірної підмножини $A \subset [0,1]$ існує розбиття $A = B \cup C$ на вимірні підмножини таке, що $B \cap C = \emptyset$ та

$$\|T(\chi(B)) - \chi(C)\| < \varepsilon,$$

де $\chi(D)$ – характеристична функція множини $D \subset [0,1]$.

Через $\mathcal{L}(X, Y)$ ми позначатимемо множину всіх лінійних неперервних операторів, що діють з банахового простору X у банахів простір Y .

Основні результати

Наступне означення уточнює, в якому сенсі ми апроксимуємо оператори.

Означення. Нехай X – банахів простір та $\varepsilon > 0$. ε -апроксимацією оператора $T \in \mathcal{L}(L_1, X)$ оператором з одновимірним образом називатимемо трійку (A, \mathcal{B}_0, x_0) , де A – вимірна підмножина $[0,1]$, \mathcal{B}_0 – безатомна під- σ -алгебра борелівської σ -алгебри $\mathcal{B}(A)$ підмножин множини A , x_0 – вектор з X , для яких виконуються наступні дві умови:

- (i) $\|T\| - \varepsilon \leq \|T|_{L_1(\mathcal{B}_0)}\|$;
- (ii) $\|T|_{L_1(\mathcal{B}_0)} - T_0\| < \varepsilon$,

де $T_0: L_1 \rightarrow X$ – оператор з одновимірним образом, заданий за допомогою формули:

$$T_0 x = (\mu(A)^{-1} \int_A x d\mu) x_0. \quad (*)$$

Наступна теорема є основним результатом цієї замітки.

Теорема. Нехай X – банахів простір і $T \in \mathcal{L}(L_1, X)$ – вузький оператор. Тоді для кожного $\varepsilon > 0$ існує ε -апроксимація оператора T .

Для доведення нам потрібна наступна лема, яка належить Розенталю [4], але потім була неодноразово перевіршена іншими математиками, див., наприклад, [5], [6]. Доведення леми Розенталю можна також знайти у [3, теорема 7.31].

Лема. Нехай X – банахів простір і $T \in \mathcal{L}(L_1, X)$. Тоді для кожного $\varepsilon > 0$ існує вимірна підмножина A відрізка $[0,1]$ строго додатної міри така, що

$$(\|T\| - \varepsilon) \|x\| \leq \|Tx\| \quad (1)$$

для довільного додатного елемента x простору L_1 , носій якого лежить в A .

Доведення теореми. Виберемо, згідно з лемою, вимірну підмножину A відрізка $[0,1]$ строго додатної міри таку, що виконується нерівність (1) для довільного додатного елемента x простору L_1 , носій якого лежить в A . Побудуємо дерево вимірних підмножин $(A_{n,k} : n = 0, 1, \dots, k = 1, 2, \dots, 2^n)$ відрізка $[0,1]$, починаючи з множини $A_{0,1} = A$ так, щоби

$$A_{n,k} = A_{n+1,2k-1} \cup A_{n+1,2k}, \quad A_{n+1,2k-1} \cap A_{n+1,2k} = \emptyset,$$

$$\mu(A_{n+1,2k-1}) = \mu(A_{n+1,2k}) = \mu(A_{n,k})/2 \quad \text{для } n = 0, 1, \dots, k = 1, 2, \dots, 2^n,$$

причому так, щоби відповідна L_∞ -нормована система Гаара $(g_i : i = 1, 2, \dots)$, що визначається рівностями $g_1 = \chi(A_{0,1})$ та

$$g_{2^n+k} = \chi(A_{n+1,2k-1}) - \chi(A_{n+1,2k}) \quad (2)$$

для $n = 0, 1, \dots, k = 1, 2, \dots, 2^n$ мала такі властивості:

$$Tg_1 = x_0; \quad \|Tg_i\| < 2^{-i-1} \varepsilon \|g_i\|, \quad i = 2, 3, \dots \quad (3)$$

Фактично, перший крок вже зроблено: $A_{0,1} = A$. Подальшу побудову здійснюватимемо рекурсивно. Нехай для даного n побудовано множини $A_{n,1}, \dots, A_{n,2^n}$ з потрібними властивостями. Побудуємо на наступному кроці множини $A_{n+1,1}, \dots, A_{n+1,2^{n+1}}$ у такий спосіб. Для кожного $k = 1, \dots, 2^{n+1}$ виберемо, згідно з означенням вузького оператора, розбиття

$$A_{n,k} = A_{n+1,2k-1} \cup A_{n+1,2k}, \quad A_{n+1,2k-1} \cap A_{n+1,2k} = \emptyset$$

так, щоби для функції g_{2^n+k} , заданої рівністю (2), виконувалась нерівність (3) з $i = 2^n+k$. Отже, дерево множин $(A_{n,k})$ та послідовність функцій (g_i) побудовано рекурсивно. Тепер визначимо \mathcal{B}_0 , як найменшу під- σ -алгебру борелівської σ -алгебри $\mathcal{B}(A)$ підмножин множини A , яка містить всі множини $A_{n,k}$ при $n = 0, 1, \dots$,

$k = 1, 2, \dots, 2^n$. Нарешті, покладемо $x_0 = T\chi(A_{0,1})$ і покажемо, що трійка (A, \mathcal{B}_0, x_0) є ε -апроксимацією оператора T . Зазначимо, що умова (i) впливає з (1). Для доведення умови (ii) скористаємося тим фактом, що система Гаара $(g_i: i = 1, 2, \dots)$ є монотонним базисом Шаудера банахового простору $L_1(\mathcal{B}_0)$, згідно з [7, с.3]. Для кожного елемента

$$x = a_1 g_1 + a_2 g_2 + \dots \quad (4)$$

простору $L_1(\mathcal{B}_0)$ позначимо

$$S_i = a_1 g_1 + \dots + a_i g_i.$$

Тоді, згідно з монотонністю базису, для кожного $i = 2, 3, \dots$ отримуємо

$$\begin{aligned} |a_i| \|g_i\| &= \|a_i g_i\| = \|S_i - S_{i-1}\| \leq \\ &\leq \|S_i\| + \|S_{i-1}\| \leq 2 \|x\|. \end{aligned}$$

Таким чином, для оператора T_0 , заданого рівністю (*), отримуємо для кожного $x \in L_1(\mathcal{B}_0)$ вигляду (4), згідно з (3)

$$\begin{aligned} \|Tx - T_0x\| &= \|a_1 Tg_1 + a_2 Tg_2 + \dots - a_1 x_0\| \leq \\ &\leq |a_2| \|Tg_2\| + |a_3| \|Tg_3\| + \dots \leq \\ &\leq 2 \|x\| \varepsilon (2^{-3} + 2^{-4} + \dots) = 2^{-1} \varepsilon \|x\|, \end{aligned}$$

а отже, (ii), а разом із тим, теорему доведено.

Приклади

Приклад 1. Позначимо $\mathbf{1} := \chi[0,1]$ та $\mathbf{r} := \chi[0,1/2] - \chi[1/2,1]$. Визначимо оператор $T: L_1 \rightarrow L_1$, поклавши для кожного x з L_1

$$Tx = \alpha \left(\int_{[0,1]} x \, d\mu \right) \mathbf{1} + \beta \left(\int_{[0,1]} x \mathbf{r} \, d\mu \right) \mathbf{r}.$$

Неважко показати, що $\|T\| = \max\{|\alpha|, |\beta|\}$. Для апроксимації оператора T оператором з одновимірним образом з довільною точністю $\varepsilon > 0$ покладемо $A = [0,1/2]$, \mathcal{B}_0 – борелівська σ -алгебра підмножин A та $x_0 = \alpha \mathbf{1} + \beta \mathbf{r}$. Тоді для довільного елемента x з $L_1(\mathcal{B}_0)$ отримуємо $Tx = \left(\int_{[0,1/2]} x \, d\mu \right) x_0$, а отже, достатньо взяти в ролі T_0 звуження оператора T на $L_1(\mathcal{B}_0)$.

Приклад 2. Розглянемо оператор $T: L_p[0,1]^2 \rightarrow L_p[0,1]$ при $1 \leq p < \infty$, заданий формулою:

$$(Tf)(x) = \int_{[0,1]} f(x,y) \, dy.$$

Таким чином, T – це оператор умовного математичного сподівання по відношенню до під- σ -алгебри множин вигляду $X^*[0,1]$, де X – довільна борелівська підмножина на $[0,1]$. Іншими словами, T – це проєктор

норми 1 на підпростір функцій, які не залежать від другої змінної. Покладемо $A = [0,1]^2$, \mathcal{B}_0 – під- σ -алгебра множин вигляду $[0,1]^* \times X$, де X – довільна борелівська підмножина на $[0,1]$. Тоді довільний елемент f з $L_1(\mathcal{B}_0)$ є функцією, не залежною від першої змінної, а отже, функція Tf є сталою, помноженою на тотожну одиницю – оператор з одновимірним образом. Як і в прикладі 1, апроксимація здійснюється за допомогою звуження самого оператора, незалежно від ε .

Обидва приклади операторів належать до класу строго вузьких операторів (оператор $T: L_1 \rightarrow X$ називається строго вузьким, якщо для довільної вимірної підмножини $A \subset [0,1]$ існує розбиття $A = B \cup C$ на вимірні підмножини таке, що $B \cap C = \emptyset$ та $T\chi(B) = \chi(C)$). Для строго вузьких операторів апроксимація операторами з одновимірними образами здійснюється незалежно від ε , що можна легко отримати з доведення теореми. З іншого боку, той факт, що оператори з прикладів 1 і 2 є строго вузькими, не є очевидним; для цього потрібно використовувати певні теореми про строго вузькі оператори (див. [3]).

Стосовно вузьких операторів, які не є строго вузькими та для яких апроксимація істотно залежить від ε , зазначимо, що такими, наприклад, є компактні оператори з нескінченновимірними образами, наприклад, оператор $T: L_1 \rightarrow L_1$, визначений рівністю

$$Tx = \sum_n 2^{-n} \left(\int_{[0,1]} x \mathbf{r}_n \, d\mu \right) \mathbf{r}_n,$$

де (\mathbf{r}_n) – система Радемахера на відрізку $[0,1]$. Проте описати конкретну апроксимацію такого оператора виявляється досить складною задачею (навіть обчислити норму такого оператора досить складно).

Список використаних джерел /
References

1. Plichko A., Popov M. Symmetric function spaces on atomless probability spaces. *Diss. Math. Rozprawy Mat.* 1990. 306. P. 1-85.
2. Popov M. Narrow operators (a survey). *Banach Center Publ.* 2011. 92. P. 299-326.
3. Popov M., Randrianantoanina B. Narrow operators on function spaces and vector lattices. 2013. De Gruyter. Berlin-Boston.
4. Rosenthal H.P. Embeddings of L^1 in L^1 . *Contemp. Math.* 1984. 26. P. 335-349.
5. Shvydkoy R.V. The largest linear space of operators satisfying the Daugavet equation in L_1 . *Proc. Amer. Math. Soc.* 2001. Vol. 130 (3). P. 773-777.
6. Mykhaylyuk V.V., Popov M.M. Some geometric aspects of operators acting from L_1 . *Positivity.* 2006. 10. p. 431-466.
7. Lindenstrauss J, Tzafriri L. Classical Banach spaces, Vol. 1, Sequence spaces. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York. 1977.

APPROXIMATION OF NARROW
OPERATORS ON THE SPACE L_1
BY RANK ONE OPERATORS

M. M. Popov¹, O. G. Fotii²

¹Vasyl Stefanyk Precarpathian National University;
57 Shevchenka str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine;
e-mail: *misham.popov@gmail.com*

²Jury Fedkovych Chernivtsi National University;2
Kotsiubynskoho str., Chernivtsi, 58012, Ukraine;
e-mail: *ofotiy@ukr.net*

УДК 517.98

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-98-101

СПЕКТР АЛГЕБРИ БЛОЧНО-СИМЕТРИЧНИХ АНАЛІТИЧНИХ
ФУНКЦІЙ НА ПРОСТОРИ $\ell_1 \oplus \ell_\infty$

В. В. Кравців

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна; e-mail: viktoria.kravtsiv@pnu.edu.ua*

Робота присвячена дослідженню алгебри блочно-симетричних поліномів та аналітичних функцій від нескінченної кількості змінних на добутку банахових просторів $\ell \oplus \ell_\infty$. Метою даної роботи було дослідження спектру (множини характерів) алгебри блочно-симетричних аналітичних функцій обмеженого типу на просторі $\ell \oplus \ell_\infty$. В ході дослідження встановлено зв'язок спектру алгебр аналітичних функцій обмеженого типу із аналітичними функціями експоненціального типу. Також наведено приклад, який показує, що спектр алгебри симетричних аналітичних функцій обмеженого типу на $\ell_1 \oplus \ell_\infty$ не збігається з множиною класів еквівалентності функціоналів значення в точках. Таким чином вдалося частково описати спектр алгебри блочно-симетричних аналітичних функцій обмеженого типу на просторі $\ell \oplus \ell_\infty$. Оскільки між максимальними ідеалами і комплексними гомоморфізмами (характерами) банахової алгебри існує взаємнооднозначна відповідність, яка задається перетворенням Гельфанда, ми можемо трактувати елементи вихідної алгебри як функції на просторі максимальних ідеалів. Таким чином, спектр функціональної топологічної алгебри є природною областю визначення для її елементів. Тому опис спектра є першою важливою задачею, яка виникає при дослідженні конкретної комутативної банахової алгебри. Тому дана стаття має важливе значення у дослідженні алгебр блочно-симетричних аналітичних функцій обмеженого типу на добутках банахових просторів.

Ключові слова: блочно-симетричні поліноми, блочно-симетричні аналітичні функції, спектр, характер.

The work is dedicated to the study of the algebra of block-symmetric polynomials and analytic functions of infinitely many variables on the product of Banach spaces. The aim of this research was to investigate the spectrum (the set of characters) of the algebra of block-symmetric analytic functions of bounded type on a given space. During the study, a connection was established between the spectrum of algebras of analytic functions of bounded type and analytic functions of exponential type. Additionally, an example was provided to demonstrate that the spectrum of the algebra of symmetric analytic functions of bounded type does not coincide with the set of equivalence classes of point evaluation functionals. As a result, it was possible to partially describe the spectrum of the algebra of block-symmetric analytic functions of bounded type on the space. Since there is a one-to-one correspondence between maximal ideals and complex homomorphisms (characters) of a Banach algebra, established via the Gelfand transform, we can interpret the elements of the original algebra as functions on the space of maximal ideals. Thus, the spectrum of a functional topological algebra is a natural domain for its elements. Therefore, describing the spectrum is the first important task that arises when studying a specific commutative Banach algebra. This article is therefore of significant importance in the study of algebras of block-symmetric analytic functions of bounded type on products of Banach spaces.

Keywords: block-symmetric polynomials, block-symmetric analytic functions, spectrum, character.

Вступ

В останні роки зріс інтерес до дослідження інваріантів дії топологічних груп на нескінченновимірних просторах. Однією з таких груп є група підстановок на множині натуральних чисел. Якщо ця група діє на банаховому просторі з безумовним базисом, переставляючи базисні вектори, то її дія природно переноситься на поліноми та аналітичні функції на цьому просторі, а інваріанти

утворюють алгебру симетричних аналітичних функцій. Класична теорія симетричних поліномів у скінченновимірних просторах досліджувалася у роботах [1-3]. Симетричні поліноми на нескінченновимірних просторах досліджувалися у роботах [4-5]. Алгебри симетричних поліномів та аналітичних функцій на ℓ_p досліджували багато авторів [6-10]. Проте, як і у класичній теорії інваріантів [1], цікавий

випадок, коли група діє на просторі, переставляючи підпростори, натягнуті на «блоки» базисних векторів. Тоді множиною інваріантів буде т. зв. алгебра блочно-симетричних аналітичних функцій. Опис та дослідження алгебраїчного базису таких алгебр проводилося у роботах [10-11]. Для вивчення конкретної комутативної алгебри важливо вміти описати її спектр (множину характерів). Відомо, що спектр алгебри цілих аналітичних функцій на просторі \mathbb{C}^s збігається з множиною функціоналів значення в точках. Описано [6-10, 12] відповідно спектри алгебри цілих симетричних аналітичних функцій $\mathcal{H}_s(\mathbb{C}^s)$ і алгебри блочно-симетричних поліномів $\mathcal{P}_{bvs}(\ell_1(\mathbb{C}^s))$ та алгебри блочно-симетричних аналітичних функцій $\mathcal{H}_{bvs}(\ell_1(\mathbb{C}^s))$. Нижче проаналізовано спектр алгебри блочно-симетричних аналітичних функцій обмеженого типу (тобто функцій, які обмежені на обмежених множинах) на деякому банаховому просторі $\ell \oplus \ell_\infty$.

Висвітлення основного матеріалу статті

Розглянемо простір $\ell_1 \oplus \ell_\infty$, елементами якого є вектори $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \left(\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \end{pmatrix}, \dots \right)$, де $(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots) \in \ell_1, (y_1, y_2, \dots, y_n, \dots) \in \ell_\infty$.

Норму на цьому просторі визначимо наступним чином

$$\begin{aligned} \|(x, y)\|_{\ell_1 \oplus \ell_\infty} &= \sup\{\|x\|_{\ell_1}, \|y\|_{\ell_\infty}\} = \\ &= \sup\left\{\sum_{i=1}^{\infty} |x_i|, \sup_{i \geq 1} |y_i|\right\}. \end{aligned}$$

Позначимо через $\mathcal{P}_{vs}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$ алгебру блочно-симетричних поліномів на просторі $\ell_1 \oplus \ell_\infty$; $\mathcal{H}_{bvs}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$ – алгебру блочно-симетричних аналітичних функцій обмеженого типу на просторі $\ell_1 \oplus \ell_\infty$; $\mathcal{M}_{bvs}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$ – спектр алгебри $\mathcal{H}_{bvs}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$. Алгебраїчний базис алгебри $\mathcal{P}_{vs}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$ утворюють поліноми

$$H^{k_1, k_2}(x, y) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i^{k_1} y_i^{k_2}, \text{ де } k_1 \geq 1, k_2 \geq 0.$$

Твердження 1. Для будь-якого $k_1 \geq 1, k_2 \geq 0$

$$\|H^{k_1, k_2}\| = 1$$

на $\ell_1 \oplus \ell_\infty$.

Доведення. $\|H^{k_1, k_2}\| = \sup_{\|(x, y)\| \leq 1} |H^{k_1, k_2}(x, y)|$.

У роботі [13] було доведено, що $\|H^{k_1, k_2}\| \leq 1$. Щоб показати рівність, розглянемо вектор

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \dots \right).$$

Тоді $\|H^{k_1, k_2}\| = \sup_{\|(x_0, y_0)\| \leq 1} |H^{k_1, k_2}(x_0, y_0)| = 1$.

Позначимо через $\hat{H}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$ – простір аналітичних функцій обмеженого типу на просторі $\ell_1 \oplus \ell_\infty$ вигляду

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k_1+k_2=m} a_{k_1, k_2} H^{k_1, k_2}(x, y).$$

Твердження 2. Простір $\hat{H}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$ ізоморфний до простору цілих функцій $H(\mathbb{C}^2)$ на \mathbb{C}^2 вигляду

$$g(t_1, t_2) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k_1+k_2=m} a_{k_1, k_2} H^{k_1, k_2} t_1^{k_1} t_2^{k_2}.$$

Доведення. Нехай

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} P_m(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k_1+k_2=m} a_{k_1, k_2} H^{k_1, k_2}(x, y).$$

Тоді радіус обмеженості ρ_0 цієї функції є нескінченним. Тобто

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \left(\|P_n\| \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{-1} = \\ &= \left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \left(\left\| \sum_{k_1+k_2=n} a_{k_1, k_2} H^{k_1, k_2} \right\| \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{-1} = (1) \\ &= \left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \left(\sup_{\|(x, y)\| \leq r} \frac{\left\| \sum_{k_1+k_2=n} a_{k_1, k_2} H^{k_1, k_2} \right\|}{\|(x, y)\|} \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{-1} = \infty. \end{aligned}$$

З теореми про степеневі ряди (див. 14) випливає, що

$$\|P_n\| \geq \sup_{(x,y) \in rB_{\mathbb{C}^2}} \sum_{k_1+k_2=n}^{\infty} |a_{k_1,k_2} H^{k_1,k_2}|,$$

тоді з (1) випливає

$$\rho_0 \leq \left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \left(\sup_{(x,y) \in rB_{\mathbb{C}^2}} \sum_{k_1+k_2=n}^{\infty} |a_{k_1,k_2} H^{k_1,k_2}| \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{-1} \leq \left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k_1+k_2=n}^{\infty} |a_{k_1,k_2} H^{k_1,k_2}| \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{-1}.$$

Отже, для будь-якого фіксованого $(x, y) \in \ell_1 \oplus \ell_\infty$ функція

$$g(t_1, t_2) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k_1+k_2=m}^{\infty} a_{k_1,k_2} H^{k_1,k_2} t_1^{k_1} t_2^{k_2}$$

є цілою функцією над \mathbb{C}^2 .

З іншого боку, нехай

$$g(t_1, t_2) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k_1+k_2=m}^{\infty} a_{k_1,k_2} H^{k_1,k_2} t_1^{k_1} t_2^{k_2}$$

є цілою функцією над \mathbb{C}^2 .

Тоді

$$\begin{aligned} \infty &= \left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k_1+k_2=n}^{\infty} |a_{k_1,k_2} H^{k_1,k_2}| \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{-1} \leq \\ &\leq \left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{k_1+k_2=n}^{\infty} a_{k_1,k_2} H^{k_1,k_2} \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{-1} \leq \\ &\leq \left(\limsup_{n \rightarrow \infty} (\|P_n\|)^{\frac{1}{n}} \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Отже, $\rho_0 = \infty$, і функція

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} P_m$$

є обмеженого типу на $\ell_1 \oplus \ell_\infty$.

Отже, $\hat{H}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$ ізоморфний до простору цілих функцій $H(\mathbb{C}^2)$ на \mathbb{C}^2 вигляду

$$g(t_1, t_2) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k_1+k_2=m}^{\infty} a_{k_1,k_2} H^{k_1,k_2} t_1^{k_1} t_2^{k_2}.$$

Покажемо, що спектр алгебри симетричних аналітичних функцій обмеженого типу на $\ell_1 \oplus \ell_\infty$ не збігається з

множиною класів еквівалентності функціоналів значення в точках. Розглянемо наступний приклад.

Приклад. Розглянемо послідовність елементів

$$e_1\left(\frac{1}{n}, y\right) = \left(\begin{pmatrix} \frac{1}{n} \\ y_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \dots \right),$$

$$e_2\left(\frac{1}{n}, y\right) = \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \\ y_2 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \dots \right), \dots$$

$$e_k\left(\frac{1}{n}, y\right) = \left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \\ y_k \end{pmatrix}, \dots \right)$$

з просторі $\ell_1 \oplus \ell_\infty$ і для кожного n визначимо

$$v_n\left(\frac{1}{n}, y\right) = e_1\left(\frac{1}{n}, y\right) + e_2\left(\frac{1}{n}, y\right) + \dots + e_n\left(\frac{1}{n}, y\right),$$

де $v_n\left(\frac{1}{n}, y\right) \in \ell_1 \oplus \ell_\infty$.

$$\text{Тоді } \delta_{v_n\left(\frac{1}{n}, y\right)}(H^{1,k}) = \frac{y_1^k + \dots + y_n^k}{n}, \forall k \geq 1.$$

З відносної компактності обмежених підмножин $M_{bvs}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$ випливає існування граничної точки ϕ_U послідовності $\delta_{v_n\left(\frac{1}{n}, y\right)}$, такої що

$$\phi_U(H^{1,k}) = \lim_U H^{1,k}(v_n\left(\frac{1}{n}, y\right)) = \lim_U \frac{y_1^k + \dots + y_n^k}{n}.$$

Твердження. Якщо φ – характер алгебри $\hat{H}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$, то $\varphi \in$ функцією експоненціального типу.

Доведення. Нехай φ – характер алгебри $\hat{H}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$. Ця алгебра породжена

$$\text{поліномами } H^{k_1,k_2}(x, y) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i^{k_1} y_i^{k_2}, \text{ де}$$

$k_1 \geq 1, k_2 \geq 0$. Тоді

$$\begin{aligned} \varphi\left(\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k_1+k_2=m}^{\infty} a_{k_1,k_2} H^{k_1,k_2}\right) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k_1+k_2=m}^{\infty} a_{k_1,k_2} \varphi(H^{k_1,k_2}) = \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k_1+k_2=m}^{\infty} a_{k_1,k_2} \xi_{k_1,k_2} < \infty. \end{aligned}$$

Тоді $\xi = (\xi_{1,0}, \dots, \xi_{k_1,k_2}, \dots) \in H(\mathbb{C}^2)$.

Отже,
$$\left(\xi, \sum_{k_1+k_2=0}^{\infty} a_{k_1,k_2} t_1^{k_1} t_2^{k_2} \right) = \sum_{k_1+k_2=0}^{\infty} a_{k_1,k_2} \xi_{k_1,k_2}$$

тоді і тільки тоді, коли $\sup_{k_1+k_2} \sqrt[k_1+k_2]{|\xi_{k_1,k_2}|} < \infty$, а це буде тоді і тільки тоді коли
$$\sum_{k_1+k_2=0}^{\infty} \frac{\xi_{k_1,k_2}}{k_1!k_2!} t_1^{k_1} t_2^{k_2}$$
 – функція експоненціального типу. Отже φ є функцією експоненціального типу.

Висновки

1. Проведено аналіз спектру алгебри блочно-симетричних аналітичних функцій обмеженого типу на банановому просторі $\ell_1 \oplus \ell_\infty$.

2. Показано, що спектр алгебри симетричних аналітичних функцій обмеженого типу на $\ell_1 \oplus \ell_\infty$ не збігається з множиною класів еквівалентності функціоналів значення в точках.

3. Доведено, що кожен характер алгебри $\hat{H}(\ell_1 \oplus \ell_\infty)$ є функцією експоненціального типу.

Список використаних джерел / References

1. Weyl H. The Classical Groups: Their Invariants and Representations; Princeton University Press: Princenton, NJ, USA, 1973.
2. Macdonald I.G. Symmetric Functions and Orthogonal Polynomials; University Lecture Series, 12; AMS: Providence, RI, USA, 1998.
3. Nemirovskii A.S., Semenov S.M. On Polynomial Approximation of Functions on Hilbert Space. *Math. USSR-Sb.*1973. Vol. 21. P.255–277. DOI: [10.1070/SM1973v021n02ABEH002016](https://doi.org/10.1070/SM1973v021n02ABEH002016)
4. González M., Gonzalo R., Jaramillo J.A. Symmetric polynomials on rearrangement invariant function spaces. *J. Lond. Math. Soc.* 1999. Vol. 59. P. 681–697. DOI: [10.1112/S0024610799007164](https://doi.org/10.1112/S0024610799007164).
5. Alencar R., Aron R., Galindo P., Zagorodnyuk A. Algebras of symmetric holomorphic functions on ℓ_p . *Bull. Lond. Math. Soc.* 2003. Vol. 35. P. 55–64.
6. Chernega I., Galindo P., Zagorodnyuk A. Some algebras of symmetric analytic

functions and their spectra. *Proc. Edinb. Math. Soc.* 2012. Vol. 55. P.125–142. DOI: [10.1017/S0013091509001655](https://doi.org/10.1017/S0013091509001655).

7. Chernega, I., Galindo, P., Zagorodnyuk, A. The convolution operation on the spectra of algebras of symmetric analytic functions. *J. Math. Anal. Appl.* 2012. Vol. 395. P. 569–577. DOI: [10.1016/j.jmaa.2012.04.087](https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2012.04.087)

8. Chernega I., Galindo P., Zagorodnyuk A. A multiplicative convolution on the spectra of algebras of symmetric analytic functions. *Rev. Mat. Complut.*2014. Vol. 27. P. 575–585. 33. DOI:[10.1007/s13163-013-0128-0](https://doi.org/10.1007/s13163-013-0128-0)

9. Chernega I.V., Zagorodnyuk A.V. Note on bases in algebras of analytic functions on Banach spaces. *Carpathian Math. Publ.* 2019. Vol.11. P. 42–47. DOI: doi.org/10.15330/cmp.11.1.42-47.

10. Bandura A., Kravtsiv V., Vasylyshyn T. Algebraic Basis of the Algebra of All Symmetric Continuous Polynomials on the Cartesian Product of ℓ_p -Spaces. *Axioms.*2022. Vol. 11(2). P. 41. DOI: [10.3390/axioms11020041](https://doi.org/10.3390/axioms11020041)

11. Kravtsiv V., Vasylyshyn T., Zagorodnyuk A. On algebraic basis of the algebra of symmetric polynomials on $\ell_p(C^n)$. *J. Funct. Spaces.* 2017. Vol.2017. P.1-8. DOI: [10.1155/2017/4947925](https://doi.org/10.1155/2017/4947925)

12. Kravtsiv V., Zagorodnyuk A. Spectra of algebras of block-symmetric analytic functions of bounded type. *Mat. Stud.* 2022. Vol. 58. P. 69–81.

13. Kravtsiv V.V. Algebraic basis of the algebra of block-symmetric polynomials on $\ell_1 \oplus \ell_\infty$. *Carpathian Math. Publ.* 2019. Vol. 11. P. 89–95. DOI: [10.15330/cmp.11.1.89-95](https://doi.org/10.15330/cmp.11.1.89-95).

14. Harold P. Boas, Khavinson D. Bohr's power series theorem in several variables. *Proceedings of the American Mathematical Society.* 1997. Vol. 125. No. 10. pp. 2975-2979.

SPECTRUM OF THE ALGEBRA OF BLOCK-SYMMETRIC ANALYTICAL FUNCTIONS IN SPACE $\ell_1 \oplus \ell_\infty$

V. V. Kravtsiv

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University;
 57 Shevchenko St., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine;
 e-mail: viktoria.kravtsiv@pnu.edu.ua

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

УДК 004.715

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-102-114

КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА ІОТ-СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТОКАРНИМ ВЕРСТАТОМ

В. М. Хода¹, О. А. Стадніченко², С. С. Некрасов³, М. О. Рожков³, Н. Г. Бузоверя⁴

¹Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова;
проспект Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007, e-mail: walhoda@gmail.com

²Український інститут експертизи сортів рослин;
вул. Генерала Родимцева, 15, м. Київ, 03041, e-mail: sops@sops.gov.ua

³Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116, м. Суми, 40007, e-mail: nekrasovss@gmail.com

⁴Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: nadiia.shyrmovska@nung.edu.ua

Метою даної статті є аналіз комп'ютеризованої системи керування токарним верстатом на основі технології Інтернету речей з метою виявлення її можливостей, переваг та потенційних обмежень. Стаття спрямована на визначення оптимальних шляхів впровадження та використання такої системи для підвищення ефективності виробничого процесу на токарних верстатах. Методами дослідження є емпіричний аналіз роботи автоматизованих систем керування токарними верстатами, теоретичний синтез компонентів системи автоматичного керування, а також комп'ютерне моделювання для візуалізації процесів взаємодії між компонентами привода та системою керування. Аналіз передбачає використання технологій Інтернету речей для збору та передачі даних, а також інтеграцію з SCADA-системами для віддаленого моніторингу та керування. Додатково використовується параметрична оптимізація для вдосконалення ефективності системи. У роботі проаналізовано та вдосконалено систему автоматичного керування приводом подачі токарного верстата, що дозволило підвищити ефективність та точність керування. Проведено параметричну оптимізацію системи, розроблено web людино-машинний інтерфейс, що забезпечує можливість віддаленого керування та моніторингу виробничого процесу. Наукова новизна роботи полягає у використанні технології Інтернету речей для автоматизації керування приводом подачі токарного верстата. Впровадження сучасних технологій передачі даних та SCADA-системи додають нові можливості для віддаленого керування та моніторингу виробничого процесу. Практична цінність роботи полягає у створенні вдосконаленої автоматизованої системи керування, яка може бути впроваджена у виробничий процес для підвищення ефективності та точності обробки на токарних верстатах. Система забезпечує інтеграцію з іншими автоматизованими системами та технологіями Інтернету речей, що розширює її функціональні можливості та області застосування.

Ключові слова: токарний верстат; автоматизація; електропривод; система керування; моделювання; оптимізація; Інтернет речей; web-інтерфейс; SCADA-система.

The purpose of this article is to analyze a computerized control system for a lathe based on Internet of Things technology to identify its capabilities, advantages, and potential limitations. The article aims to determine the optimal ways of implementing and utilizing such a system to enhance the efficiency of the manufacturing process on lathe machines. The research employs empirical analysis of automated control systems for lathes, theoretical synthesis of control system components, and computer modeling for visualizing interaction processes. IoT technologies are utilized for data collection and transmission, along with integration with SCADA systems for remote monitoring and control. Parametric optimization is additionally used to enhance system efficiency. The study analyzes and enhances the automatic control system for the lathe's feed drive, increasing efficiency and precision. Parametric optimization of the system is conducted, and a web-human-machine interface is developed, enabling remote control and monitoring of the manufacturing process. The scientific novelty of the work lies in the use of IoT technology for automating the control of a lathe's feed drive. The integration of modern data transmission technologies and SCADA systems adds new capabilities for remote control and monitoring of the manufacturing process. The practical value of the work lies in creating an improved automated control system that can be implemented in the manufacturing process to enhance efficiency and accuracy in lathe machining.

The system integrates with other automated systems and IoT technologies, expanding its functional capabilities and application areas.

Keywords: lathe; automation; electric drive; control system; modeling; optimization; Internet of Things; web interface; SCADA system.

Вступ

Сучасні технології Інтернету речей (IoT) відіграють важливу роль у вдосконаленні систем керування промисловим обладнанням, зокрема токарними верстатами. Хоча існують значні досягнення в цій галузі, все ще існують технічні виклики, які потрібно вирішити для повного впровадження цих технологій. Відмінність вимог промислового середовища створює потребу у розробці більш гнучких, ефективних, безпечних та вартісно-ефективних систем керування токарними верстатами на основі IoT. Такі системи можуть бути застосовані у виробництві, де вони забезпечують віддалений моніторинг та керування верстатами, а також надають можливості для збору та аналізу даних для оптимізації виробничого процесу. Отже, для успішного впровадження таких систем необхідно розв'язати технічні виклики, пов'язані з покращенням гнучкості, ефективності, безпеки та зниженням вартості, щоб забезпечити їхню оптимальну роботу в промислових умовах.

Метою дослідження є аналіз комп'ютеризованої системи керування токарним верстатом на основі технології Інтернету речей з метою виявлення її можливостей, переваг та потенційних обмежень. Дослідження спрямоване на визначення оптимальних шляхів впровадження та використання такої системи для підвищення ефективності виробничого процесу на токарних верстатах.

Об'єктом дослідження є комп'ютеризована система керування токарним верстатом на основі технології Інтернету речей, призначена для оптимізації виробничого процесу. Предметом дослідження є методи та програмно-технічні засоби, спрямовані на підвищення ефективності та точності керування токарним верстатом.

Для досягнення цієї мети використовуються методи емпіричного аналізу роботи автоматизованих систем керування, теоретичного синтезу компонентів системи автоматичного керування, а також комп'ютерного моделювання для візуалізації процесів взаємодії між компонентами привода та системою керування. Крім того, використовується аналіз технологій Інтернету речей для збору та передачі даних, інтеграція з SCADA-системами для віддаленого моніторингу та керування, а також параметрична оптимізація для вдосконалення ефективності системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналізуючи останні дослідження і публікації з проблеми IoT, можна відзначити кілька ключових тенденцій та напрямків розвитку цієї галузі.

Публікації [1] та [2] зосереджені на застосуванні IoT у сфері містобудування та розвитку "розумних" міст. Це означає, що IoT може використовуватися для оптимізації управління міськими ресурсами, зменшення витрат енергії, поліпшення транспортної інфраструктури та більш ефективного управління водними ресурсами.

Дослідження [3] підкреслює важливість IoT для сектору енергетики. Впровадження IoT у цій галузі допомагає підвищити ефективність виробництва та передачі електроенергії, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів та зменшення витрат.

Публікація [4] вказує на використання штучного інтелекту у розробці пристроїв та мереж IoT. Це відкриває нові можливості для підвищення рівня автоматизації, прогнозування та оптимізації роботи IoT-систем.

Дослідження і публікації також вказують на вплив IoT на різні галузі, включаючи медицину, будівництво,

сільське господарство та археологію. Інтеграція IoT дозволяє підвищити продуктивність, ефективність та безпеку в цих галузях.

Отже, останні дослідження та публікації свідчать про постійний розвиток технології IoT та її вплив на різні аспекти суспільства. Інтеграція IoT в різні сфери діяльності відкриває нові можливості для оптимізації процесів, підвищення продуктивності та покращення якості життя.

Виокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Сучасні технології IoT відкривають нові перспективи для систем керування токарними верстатами, проте існують технічні виклики, що перешкоджають повному використанню їхнього потенціалу. На перший план виходить необхідність розробки більш гнучких систем керування, здатних адаптуватися до різноманітних умов виробництва. Крім того, зниження вартості впровадження та експлуатації IoT-систем стає важливим аспектом, щоб зробити їх доступними для підприємств будь-якого розміру. Розв'язання цих викликів сприятиме ефективнішому використанню технологій IoT у промисловому виробництві та підвищить його продуктивність та конкурентоспроможність.

Основний матеріал

Аналіз технічних рішень для системи автоматичного керування приводом подачі токарного верстата. Електропривод комплектний тиристорний постійного струму ЭТУ-3601 призначений для створення високомоментних швидкісних приводів подачі металорізальних верстатів, включаючи верстати з числовим програмним управлінням (ЧПУ). Він працює від трифазної мережі змінного струму з напругою 380 В і частотою 50 Гц [5].

ЭТУ-3601 включає в себе тиристорний перетворювач відкритої модульної конструкції зі ступенем захисту IP00 для установки в шафу, реакторну установку, технологічний датчик швидкості, і двигун

з вбудованим тахогенератором. Перетворювач уніфікований і може працювати з різними двигунами постійного струму потужністю від 0,5 до 18,5 кВт (2пФ, 2ПБ, 2По, ПСТ, ПБСТ, ПБЗ).

Умови експлуатації передбачають невибухонебезпечне середовище, яке не містить струмопровідного пилю, агресивних газів і парів у концентраціях, що руйнують метали та ізоляцію, і не насичене водяними парами або струмопровідним пилом.

Електропривод ЭТУ-3601 стійкий до електродинамічних впливів при коротких замиканнях і внутрішніх порушеннях протягом часу дії захисту і комутаційної апаратури. Корпус має болт для підключення шини заземлення.

Основні технічні характеристики електропривода повинні відповідати параметрам, наведеним у таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики електропривода

Назва параметру	Вимоги технічних умов
Діапазон регулювання швидкості	1000; 10000
Номинальний струм, А	40
Номинальна напруга, В	115
Номинальний момент двигуна, Н·м	від 7 до 47
Максимальна швидкість двигуна, об/хв	2000; 1000
Напруга живлення, В	220, 380 ± 10 %
Частота напруги живлення, Гц	50 ± 2 %

Значення похибки та коефіцієнта нерівномірності обертання двигуна вказані в таблиці 2.

Параметрична оптимізація САК привода подачі токарного верстата. Синтез регуляторів за допомогою параметричної оптимізації в програмі PID Controller (рис. 1) з автоналаштуванням, яка вбудована в Simulink, є ключовим етапом в проектуванні систем автоматичного управління. Цей підхід дозволяє

Таблиця 2 – Похибка і коефіцієнт нерівномірності

Діапазон частоти обертання	Похибка частоти обертання, % не більше			Коефіцієнт нерівномірності
	Сумарна похибка	Похибка при зміні навантаження	Похибка при зміні напрямку обертання	
$n_{НОМ}$	± 2	$\pm 0,5$		0,1
$0,1 \cdot n_{НОМ}$	± 10	± 2		0,1
$0,01 \cdot n_{НОМ}$	± 15	± 5		0,2
$0,001 \cdot n_{НОМ}$	± 25	± 10		0,25
$0,0001 \cdot n_{НОМ}$	± 35	± 15		0,3

автоматично налаштувати параметри ПД-регулятора для досягнення заданих характеристик системи, таких як стабільність, швидкість відгуку та точність регулювання.

демонструє поведінку системи при їх використанні без подальшої оптимізації чи коригування.

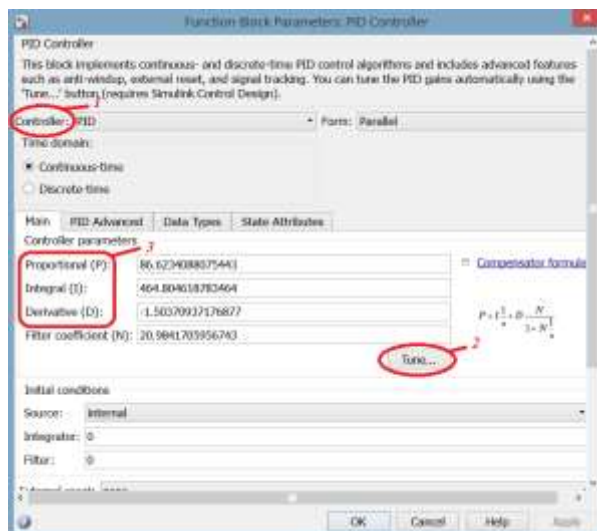


Рисунок 1 – Вікно конфігурації параметрів регулятора: 1 – лінія вибору типу регулятора; 2 – кнопка активації автоматичного вибору коефіцієнтів регулятора; 3 – рядки коефіцієнтів регулятора

Використання автоналаштування спрощує процес проектування, зменшує час настройки регулятора та забезпечує його оптимальну працездатність в різних умовах експлуатації. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність та надійність роботи електроприводу, що є важливим для безперебійного функціонування виробничих процесів на промислових підприємствах [6].

На рис. 2 показана реакція в робочій точці замкнутої системи з початковими коефіцієнтами ПД-регулятора, що

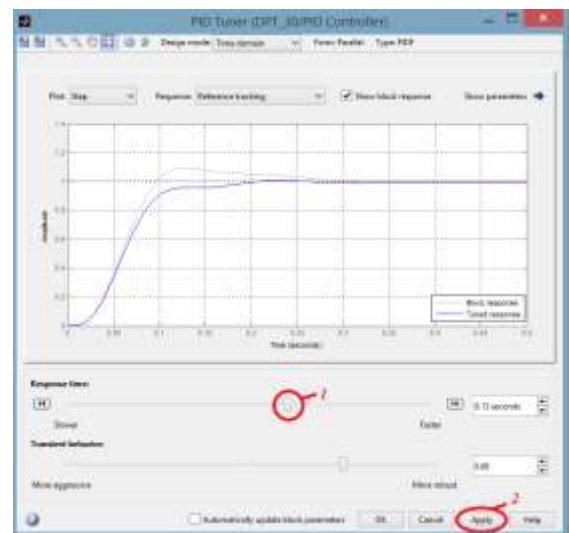


Рисунок 2 – Вікно PID Tuner: 1 – курсор налаштування часу реакції системи; 2 – кнопка оновлення

На рис. 3 зображена схема моделювання, яка використовується для аналізу та дослідження поведінки системи управління з використанням запропонованого ПД-регулятора. Ця схема дозволяє виконувати симуляції роботи системи в різних умовах та налаштовувати параметри регулятора для досягнення оптимальної продуктивності та стабільності системи управління.

Для оптимального функціонування ПД-регулятора швидкості були визначені наступні коефіцієнти: пропорційний - 3,65327115822712, інтегральний - 7,14876327536415, та коефіцієнт фільтру - 1194,5128617512. Ці значення були встановлені з метою забезпечення

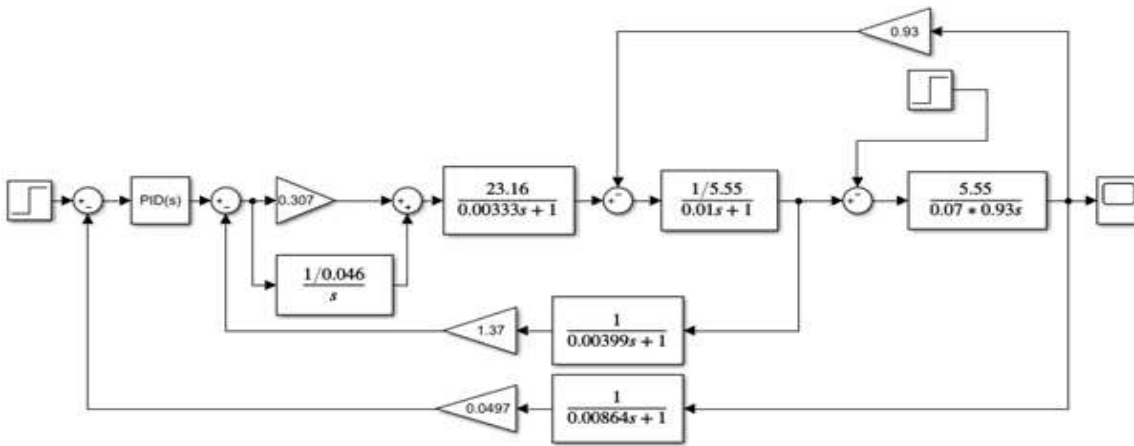


Рисунок 3 – Схема замкнутої САК з блоком PID Controller

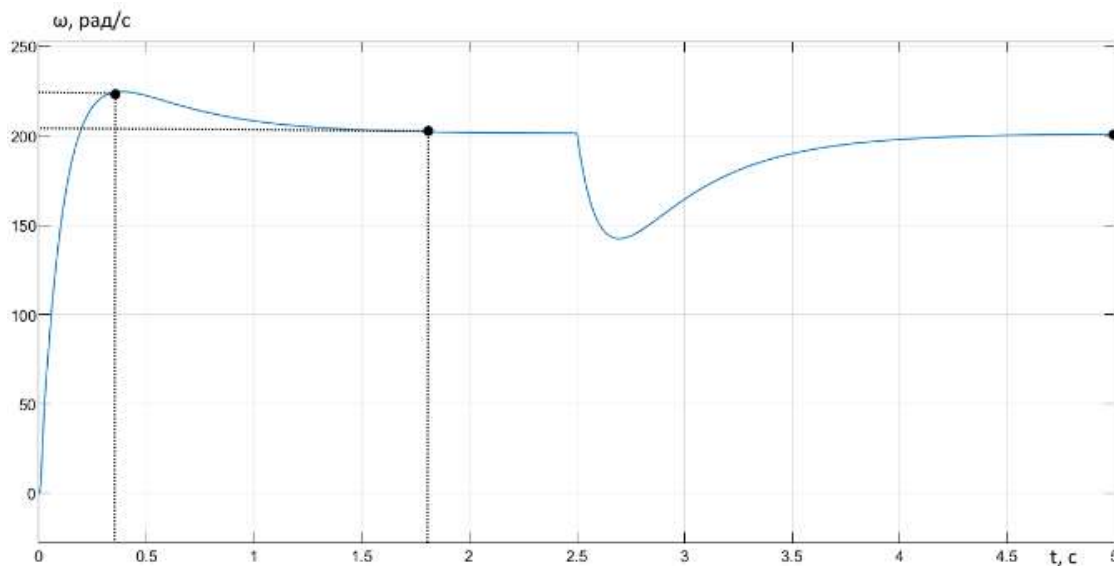


Рисунок 4 – Графік перехідного процесу оптимізованої замкнутої САК

ефективного та стабільного керування швидкістю системи з урахуванням її динаміки та особливостей роботи. Оптимально підібрані коефіцієнти дозволяють досягти балансу між швидкістю реакції системи та стійкістю регулювання, що важливо для досягнення високої продуктивності та якості управління.

Отримаємо графік перехідного процесу оптимізованої системи автоматичного керування, який представлений на рис. 4. Цей графік відображає динаміку зміни вихідної величини системи у відповідь на зміни у вхідному сигналі чи умовах роботи. Він дозволяє оцінити швидкість досягнення стабільного режиму роботи та інші характеристики ефективності та стійкості системи управління.

Показники якості системи автоматичного керування включають такі характеристики: час регулювання $t_r=1.8$ секунди, перерегулювання (1), статична помилка (2), та показник коливальності $\mu=1$.

Час регулювання визначає час, необхідний для системи досягнути стабільного режиму після збурення. Перерегулювання вказує на перевищення максимального значення вихідної величини системи відносно цільового значення. Статична помилка - це відхилення між поточним та цільовим значеннями у стабільному режимі. Показник коливальності оцінює ступінь коливань системи та її стійкість, де менше значення вказує на більшу стійкість [7].

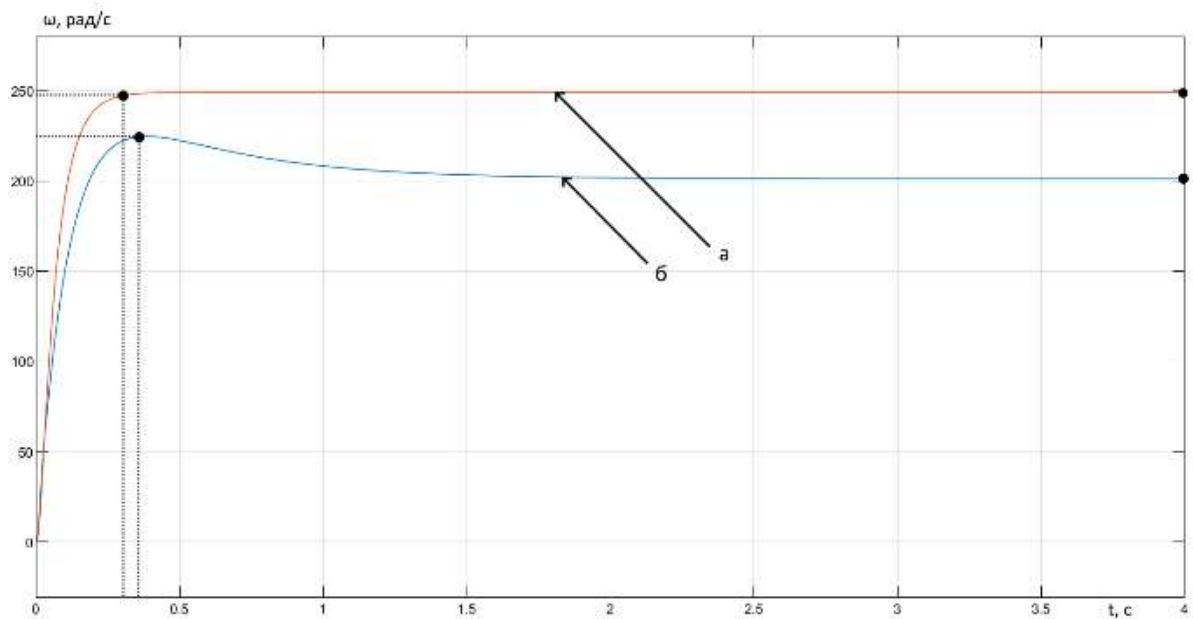


Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів без збурюючого впливу:
 а – розімкнута система; б – замкнута система

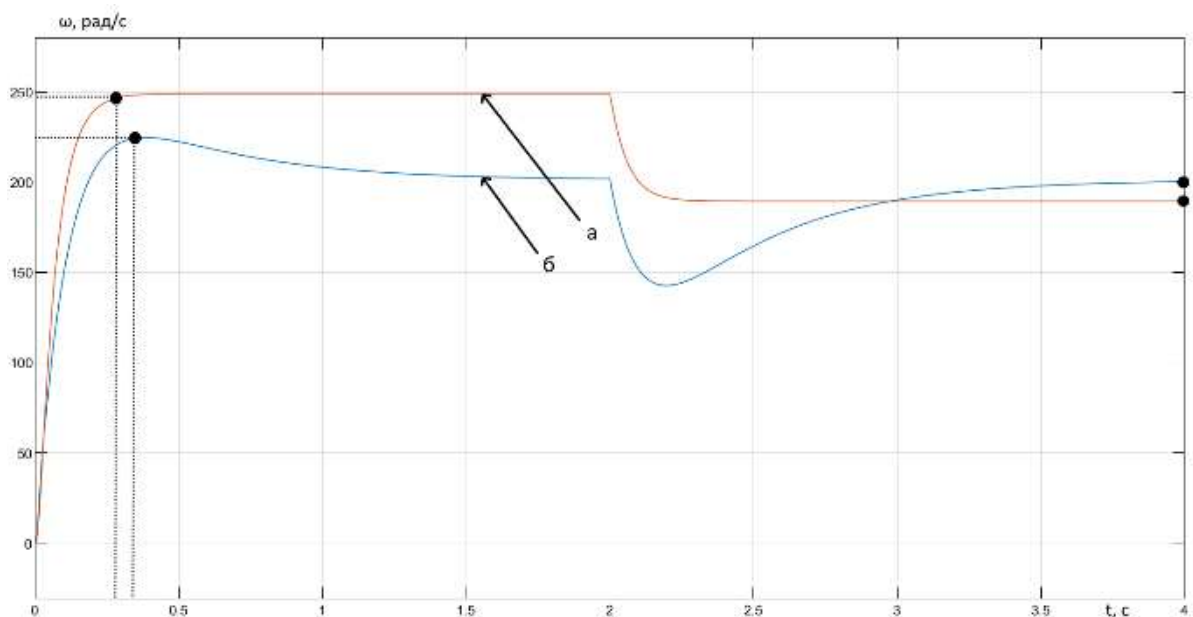


Рисунок 6 – Графіки перехідних процесів зі збурюючим впливом:
 а – розімкнута система; б – замкнута система

$$\sigma_{\max} = \frac{Y_{\max} - Y_{уст}}{Y_{уст}} \cdot 100\% = \frac{224 - 201,2}{201,2} \cdot 100\% = 1, \quad (1)$$

$$\sigma_{ст} = \frac{Y_{уст} - Y_{зад}}{Y_{зад}} \cdot 100\% = \frac{201,2 - 200}{200} \cdot 100\% = 0,06\%, \quad (2)$$

Згідно з графіком, час регулювання складає 1,8 секунди, що відповідає вимогам для налаштованого електроприводу. Перерегулювання в цьому

випадку становить менше 20%, що також відповідає допустимому рівню. Таким чином, конфігурація оптимальна для використання у практиці. Для кращого уявлення про перехідні процеси побудуємо графіки на одній осі координат як без збурюючого впливу (рис. 5), так і з ним (рис. 6), що дозволить нам детальніше оцінити роботу розімкненої та замкненої систем.

Замкнуті системи автоматизації відрізняються від розімкнутих застосуванням обладнання та повнотою автоматизації. У розімкнутій системі автоматичного керування контролер не отримує інформацію про поточний режим роботи електродвигуна.

У замкнутій системі автоматичного керування інформація передається до елементів керування, супроводжуючись відповідними командними сигналами. Подання цієї інформації дозволяє замкнути ланцюг керування, створюючи замкнуту систему автоматизації або систему автоматизації з зворотним зв'язком. Така конфігурація дозволяє системі реагувати на зміни в середовищі та внутрішні збурення, коригувати робочі параметри та забезпечувати стабільну та точну роботу електродвигуна. Замкнуті системи автоматизації зазвичай використовуються там, де необхідно точне регулювання та висока стійкість роботи, наприклад, у виробництві, транспорті, енергетиці та інших галузях промисловості.

Показники якості САК наведені в таблиці 3, що включає в себе такі параметри, як час регулювання, перерегулювання, статична помилка та показник коливальності. Додатково до цих показників можуть також включатися інші параметри, які характеризують продуктивність та ефективність роботи системи автоматичного керування.

Таблиця 3 – Показники якості системи керування

	Без оптимізації	З оптимізацією
t_p, c	0,2	1,8
$\sigma_{max}, \%$	75,9	11,3
$\delta_{ст}, \%$	0,06	0,06
μ	3	1

Інтеграція Інтернету речей. Система управління токарним верстатом моделі 16K20Ф3 розглядається як інтегрований комплекс технологій, орієнтований на вдосконалення управління та моніторингу промислових процесів за допомогою передових засобів IoT. Основна структура

системи (рис. 7) розділяється на два ключових блоки - локальний та віддалений контроль [8].

У локальному контролі, фокус спрямований на фізичні компоненти токарного верстата. Центральним елементом є токарний верстат, відповідальний за виконання операцій з обробки матеріалів. Шини дискретних та аналогових сигналів включають в себе індуктивні датчики та контактори, які забезпечують збір та реакцію на ключові дані щодо стану обладнання. RS485 мережа дозволяє сполучати та взаємодіяти з різними пристроями, такими як I7051, I7018P, I7024, використовуючи стандартний промисловий протокол.

WP-8131 виконує важливу роль у забезпеченні стабільності та надійного зв'язку всієї системи. RS232 та Ethernet мережа, які включають в себе промисловий ПК, становлять основний вузол для координації та керування локальними функціями.

У віддаленому контролі, Ethernet мережа виступає важливим мостом між локальним контролем та глобальною мережею. Хмара Інтернету включає мобільні пристрої та ПК-сервер для можливості ефективного дистанційного моніторингу та управління токарним верстатом через веб-інтерфейс.

Реалізація такої структури спрямована на розв'язання завдань, пов'язаних з ефективним управлінням, сполучаючи технічні можливості токарного верстата та переваги Інтернету речей. Цей підхід сприяє досягненню максимальної продуктивності та ефективності в промисловому виробництві, а також надає можливість зручного дистанційного моніторингу та управління системою.

У контексті локального контролю, додаткова вага приділяється надійності та точності керування фізичним обладнанням. Технологічний прогрес індуктивних датчиків та аналогових контакторів дозволяє збирати не лише базову інформацію про стан, але й забезпечує можливість оперативного

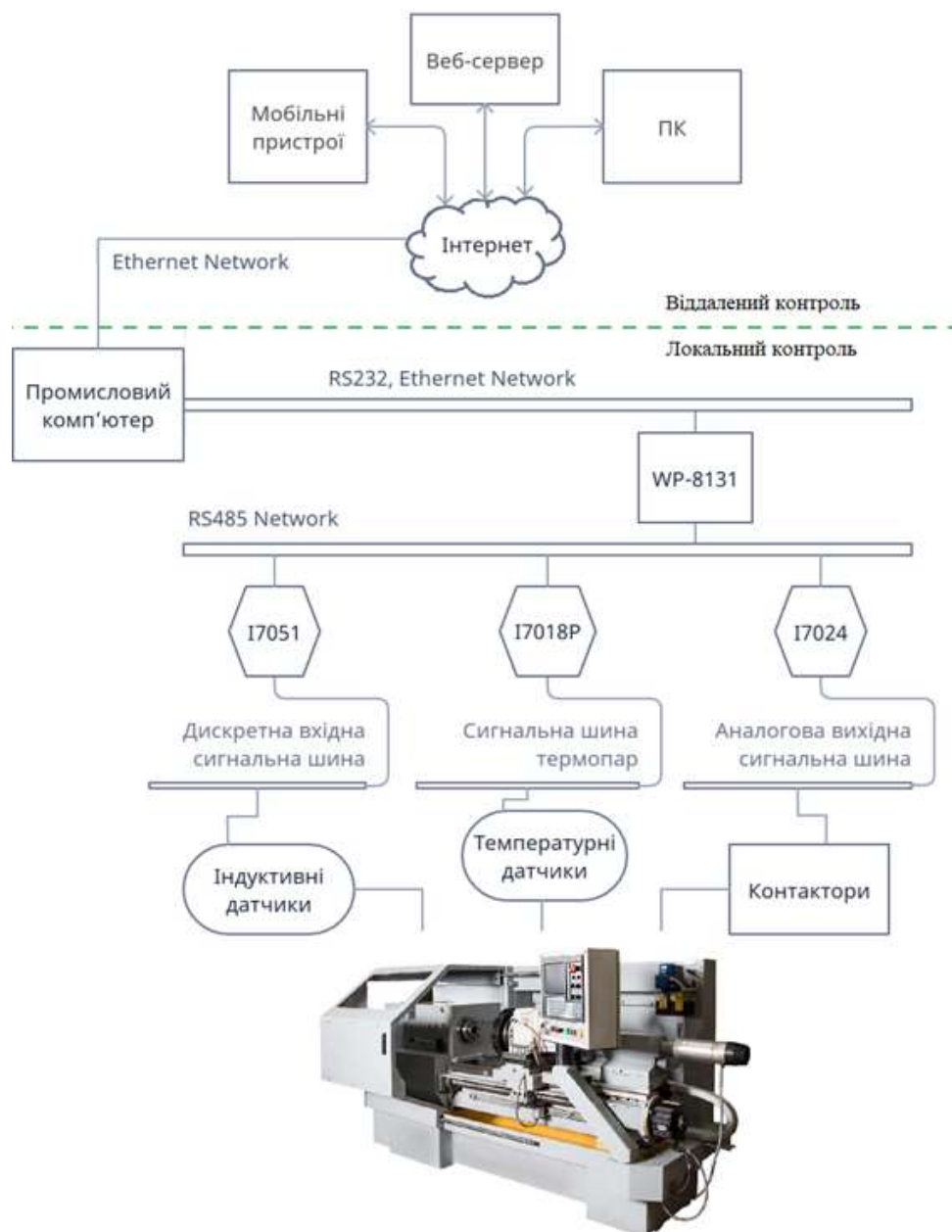


Рисунок 7 – Функціональна схема комп'ютеризованої системи керування токарним верстатом

реагування на зміни в робочому середовищі. RS485 мережа, в свою чергу, є невід'ємною частиною цієї локальної екосистеми, створюючи сприятливі умови для взаємодії різноманітних пристроїв та забезпечення їх синхронності.

Ще однією ключовою складовою є система числового програмного керування (ЧПК), яка використовується для точного та автоматизованого керування рухом верстата. Це дозволяє досягти високої точності та ефективності обробки, а також впроваджує можливість оперативного втручання оператора при необхідності.

Загальний підхід до локального контролю базується на інтеграції технічних можливостей верстата та прогресивних інструментів IoT, забезпечуючи високий рівень автоматизації та контролю виробничих процесів.

Цей високий рівень інтеграції та автоматизації в локальному контролі не лише сприяє підвищенню продуктивності, але й відкриває нові перспективи для оптимізації виробничих процесів. За допомогою прогресивних інструментів IoT оператори можуть отримувати

реальний часовий потік даних, що дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни та оптимізувати налаштування верстата. Такий підхід сприяє не лише ефективності виробництва, але й зменшенню витрат та підвищенню загальної надійності системи управління токарним верстатом.

Важливим аспектом локального контролю є також забезпечення безпеки промислових процесів. Інтеграція сучасних систем безпеки, які виявляють відхилення від стандартних параметрів роботи обладнання, дозволяє оперативно реагувати на потенційні загрози та уникнути аварійних ситуацій. Подальше вдосконалення цієї системи може включати в себе використання штучного інтелекту для прогнозування можливих проблем та автоматичного налаштування параметрів для попередження виникнення небезпечних ситуацій.

Крім того, з поглибленням інтеграції IoT в локальний контроль, відкриваються можливості для збору та аналізу великої кількості даних про роботу верстата. Це дозволяє не лише відстежувати поточний стан обладнання, а й використовувати аналітичні методи для виявлення тенденцій та покращення стратегій обслуговування та управління ресурсами.

Такий комплексний підхід до управління токарним верстатом дозволяє підвищити якість продукції, знизити витрати та забезпечити більшу надійність у виробничих процесах.

Завдяки впровадженню IoT, дані, що збираються з токарного верстата, можуть бути використані для виявлення аномалій та передбачення витратних ресурсів. Це дозволяє операторам та інженерам вживати заходів з попереднього обслуговування, що зменшує ризик непередбачуваних збоїв та збільшує ефективність виробничих процесів. Крім того, аналіз даних IoT може виявити шляхи для оптимізації продуктивності верстата та зменшення витрат енергії, що сприяє зниженню виробничих витрат та підвищенню конкурентоспроможності підприємства.

Впровадження Trace Mode Data Center. Створюємо IoT-систему керування токарним верстатом на базі Trace Mode Data Center (рис. 8). Проект розгортається на двох комп'ютерах: один для керування, інший для веб-сервера Trace Mode [9].

Data Center виступає в якості веб-шлюзу для локальної АСУ ТП, приймає дані від МРЧ за допомогою I-NET (TCP/IP) та надає веб-доступ через браузері або SCADA Mobile. Це забезпечує зручний та швидкий віддалений моніторинг технологічного процесу.

Web SCADA дозволяє відстежувати процес з будь-якого комп'ютера, представляючи дані на мнемосхемах, трендах та персоналізованих звітах. Такий підхід не лише спрощує відслідковування стану системи, але й надає індивідуалізовані звіти для кожного користувача, покращуючи зручність управління та прийняття рішень.

Цей інтегрований підхід дозволяє не лише забезпечити ефективне керування верстатом, але й використовувати дані для аналізу та оптимізації виробничих процесів, сприяючи підвищенню продуктивності та конкурентоспроможності підприємства.

Підходячи до реалізації цієї IoT-системи, важливо враховувати потужності Trace Mode Data Center у плані розширення та адаптації. Його можливості взаємодії з декількома серверами локальної АСУ ТП дозволяють масштабувати систему для інших виробничих одиниць або об'єднувати з іншими АСУ для централізованого моніторингу.

Крім того, можливість налаштування індивідуальних звітів для кожного користувача підвищує гнучкість системи в адаптації до різних вимог та ролей персоналу.

Застосування цієї IoT-системи не лише спрощує керування верстатом, а й вносить інновації в процес виробництва, роблячи його більш ефективним та динамічним.

Результатом буде не тільки підвищення продуктивності, але й створення бази даних для подальшого

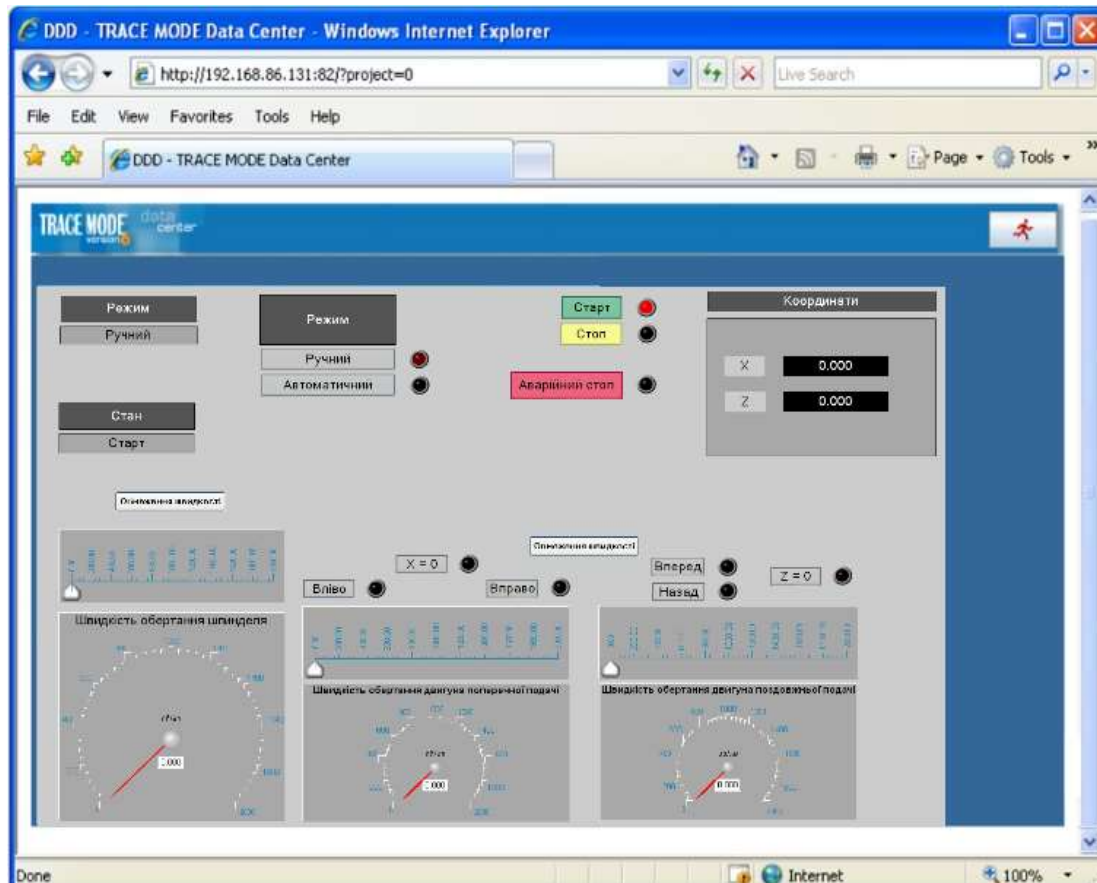


Рисунок 8 – Web-людино-машинний інтерфейс IoT-системи керування токарним верстатом

вдосконалення технологічних процесів та прийняття стратегічних управлінських рішень.

У додаток до вищезазначеного, Trace Mode Data Center володіє вбудованими засобами безпеки, які гарантують захист від несанкціонованого доступу та забезпечують цілісність даних. Це надає важливий аспект забезпечення надійності та безпеки виробничого процесу. Можливість реалізації протоколів шифрування та автентифікації дозволяє уникнути потенційних загроз і забезпечити конфіденційність важливої інформації.

Крім того, система відкрита для інтеграції з іншими IoT-пристроями та платформами, що робить її універсальною та готовою до майбутніх технологічних розвитків. Це створює можливості для розширення функціональності системи та впровадження нових технологій для ще більш ефективного використання ресурсів та оптимізації виробничих процесів.

Узагальнюючи, використання Trace Mode Data Center для IoT-системи керування токарним верстатом пропонує повний спектр можливостей, що охоплюють не лише основні завдання автоматизації, а й враховують сучасні вимоги до безпеки, масштабованості та інтеграції. Це робить систему важливим інструментом для підприємств, що прагнуть до інноваційного та конкурентоспроможного виробництва.

Людино-машинний інтерфейс токарного верстата надає зручність у керуванні його режимами. В ручному режимі оператор може вибирати напрямок переміщення. При використанні автоматичного режиму вказуються точні координати переміщення. Зміна статусу на "стоп" призводить до негайної зупинки двигунів. Аварійний стоп включається автоматично, якщо швидкість двигуна перевищує задане обмеження. Крім того, інтерфейс дозволяє вивчати перехідні процеси швидкості двигунів (рис. 9-11).

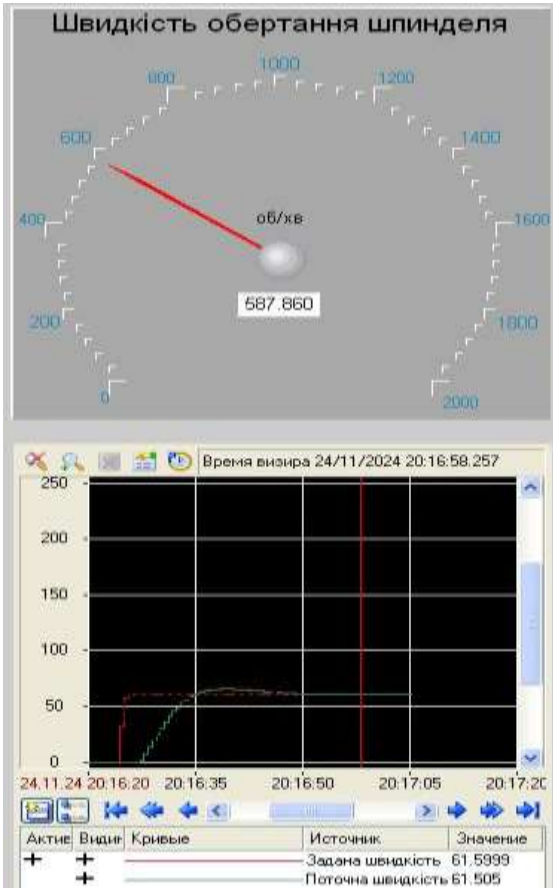


Рисунок 9 – Перехідний процес швидкості обертання шпинделя, в рад/с

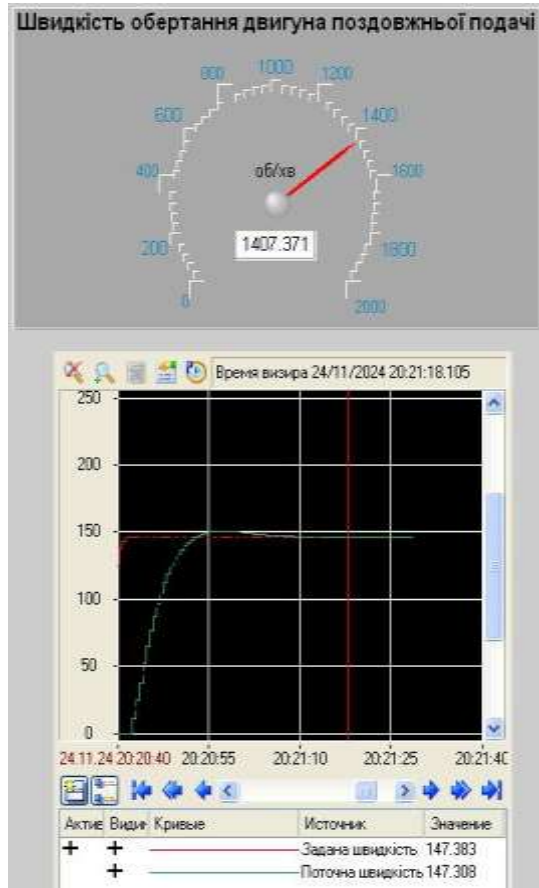


Рисунок 11 – Перехідний процес швидкості обертання двигуна поздовжньої подачі, в рад/с

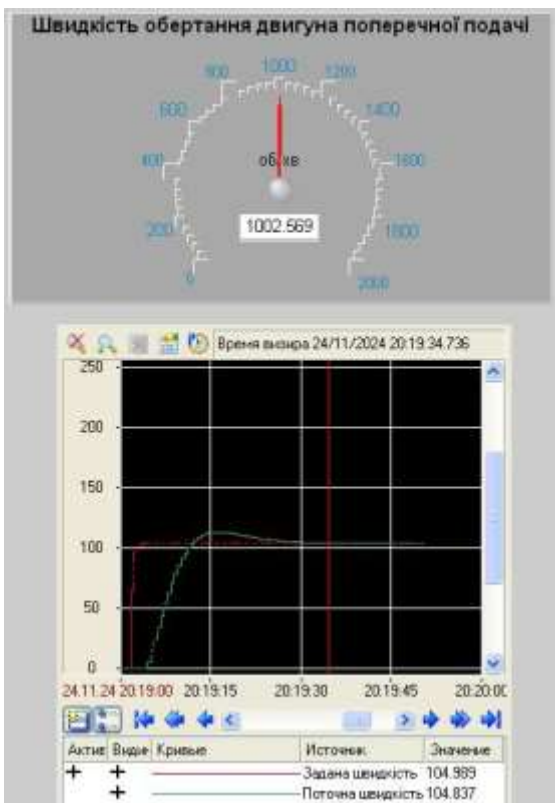


Рисунок 10 – Перехідний процес швидкості обертання двигуна поперечної подачі, в рад/с

Висновки

У даній статті розглянуто важливі аспекти використання комп'ютеризованої системи керування токарним верстатом з використанням технології Інтернету речей. Дослідження показало, що інтеграція електроприводу та системи автоматизованого керування (САК) на основі IoT може значно підвищити ефективність виробничого процесу та точність керування токарним верстатом. Результати дослідження свідчать про перспективність використання цих технологій у виробничих умовах, що може призвести до підвищення продуктивності та зниження витрат на виробництво. Інтеграція IoT та Trace Mode Data Center забезпечує зручний віддалений моніторинг та управління верстатом, що є ключовим для оптимізації виробничих процесів. Такий інтегрований підхід відображає важливий крок у напрямку розвитку сучасних виробничих систем, спрямований

на досягнення оптимальних результатів у виробничій сфері.

В процесі аналізу основні актуальні завдання до створення та удосконалення комп'ютеризованих систем керування токарними верстатами на основі технології Інтернету речей визначено такі: забезпечення стабільності та надійності системи, підвищення ефективності виробничих процесів. Для досягнення цих цілей важливо розвивати алгоритми керування, які забезпечують безперебійну роботу верстатів, та впроваджувати системи автоматизації для оптимізації використання ресурсів.

Список використаних джерел

1. Підруцький Д. А., Січко Т. В. Застосування технології Інтернету речей. *Прикладні аспекти сучасних міждисциплінарних досліджень*, 2024. С. 239-240.

2. Шпак О., Федорка П., Пригара М. Розумні міста та Інтернет речей: вплив розробок у сфері ІТ на розвиток міст і покращення якості життя. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2023. Т. 25, №3. С. 114-128.

3. Bunke O., Novikov P. Тенденції розвитку Інтернету речей в енергетиці. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. 2024. №54. С. 53-59.

4. Макогон В. І., Поліщук Ю. О. Використання штучного інтелекту у розробці мереж та пристроїв ІоТ. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. *ВНТУ*. 2024.

5. ЭТУ-3601 [Електронний ресурс] – *Западприбор*. – Режим доступу: <https://zapadpribor.com/etu3601>.

6. Драган М. П. Програмна оптимізація електронного регулювання швидкості холостого ходу двигуна внутрішнього згорання, керуючи кутом випередження запалювання. 2011.

7. Ладанюк А. П., Архангельська К. С., Власенко Л. О. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами. 2014.

8. Боднарук В., Мануляк І., Мельничук С. Аспекти класифікації пристроїв та систем Інтернету речей при їх імплементації. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. Т. 2, №333. С. 302-307.

9. Qays Md Ohirul. Monitoring of renewable energy systems by IoT-aided SCADA system. *Energy Science & Engineering*. 2022. Vol. 6, No 10. P. 1874-1885.

References

1. Pidrutskyi D. A., Sichko T. V. Zastosuvannya tekhnolohiyi Internetu rechey. *Prikladni aspekty suchasnykh mizhdyzcyplinarnykh doslidzhen*, 2024. P. 239-240. [in Ukrainian].

2. Shpak O., Fedorka P., Pryhara M. Rozumni mista ta Internet rechey: vplyv rozrobok u sferi IT na rozvytok mist i pokrashchennya yakosti zhyttya. *Suchasnyy stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohiy v promyslovosti*. 2023. Т. 25, №3. P. 114-128. [in Ukrainian].

3. Bunke O., Novikov P. Tendentsiyi rozvytku Internetu rechey v enerhetytsi. *Computer-integrated technologies: education, science, production*. 2024. №54. P. 53-59. [in Ukrainian]

4. Makohon V. I., Polishchuk Y. O. Vykarystannya shtuchnoho intelektu u rozrobtsi merezh ta prystroyiv IoT. Disertatsiya na zdobuttya naukovogo stupenya doktora tekhnichnykh nauk. *VNTU*. 2024. [in Ukrainian].

5. ETU-3601 [Electronic resource]. – *Zapadpribor*. – Access mode: <https://zapadpribor.com/etu3601>.

6. Dragan M. P. Programna optymizatsiya elektronnoho rehulyuvannya shvydkosti kholostogo khodu dvyhuna vnutrishnoho zhorannya, keruyuchy kutom vyperedzhennya zapalyvannya. 2011. [in Ukrainian].

7. Ladanuk A. P., Arkhangelska K. S., Vlasenko L. O. Teoriya avtomatychnoho keruvannya tekhnolohichnymy ob'iektamy. 2014. [in Ukrainian].

8. Bodnaruk V., Manuliak I., Melnychuk S. Aspekty klasyfikatsiyi prystroyiv ta system Internetu rechet pry yikh implementatsiyi. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. T. 2, №333. P. 302-307. [in Ukrainian].

9. Qays Md Ohirul. Monitoring of renewable energy systems by IoT-aided SCADA system. *Energy Science & Engineering*. 2022. Vol. 6, No 10. P. 1874-1885.

COMPUTERIZED IOT-SYSTEM FOR CONTROL OF LATHE

V. M. Khoda^{1*}, O. A. Stadnichenko², S. S. Nekrasov³,
M. O. Rozhkov³, N. G. Buzoveria⁴

¹Admiral Makarov National University of Shipbuilding;
9 Heroes of Ukraine Avenue, Mykolaiv, 54007,
Ukraine, e-mail: walhoda@gmail.com

²Ukrainian Institute of Plant Variety Examination;
15 Henerala Rodymtseva Str., Kyiv, 03041, Ukraine,
e-mail: sops@sops.gov.ua

³Sumy State University; 116, Kharkivska Str., Sumy,
40007, Ukraine, e-mail: nekrasovss@gmail.com

⁴Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil
and Gas; 15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019,
Ukraine, e-mail: nadiia.shyrmovska@nung.edu.ua

УДК 004

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-115-120

ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ ДАТАСЕТІВ ДЛЯ НАВЧАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

І. С. Яковин¹, Р. Т. Красняк¹, А. А. Шкітов², Р. П. Томашівський¹

¹*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна;
e-mail: igor.com.2009@gmail.com, roman.krasnyak@gmail.com*

²*Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»;
вул. Львівська 23, м. Київ, 03115, Україна; e-mail: office@uu.ua*

У статті проаналізовано ключові аспекти формування навчальних датасетів, включаючи зображення об'єктів, для підготовки штучних нейронних мереж, зокрема на платформі YOLO, яка широко використовується для задач розпізнавання. Предметом дослідження є процес ідентифікації та класифікації об'єктів, пов'язаних із дорожніми сценаріями, таких як трасові моделі авто, перепони та поверхня доріжки. У статті представлено підхід до створення двовимірних зображень із відповідною анотацією класів "моделі авто", "траса" та "перепони". Особливу увагу приділено методам аугментації даних, які дозволяють збільшити варіативність та покращити якість навчальних вибірок, що є критично важливим для ефективності навчання нейронних мереж. У дослідженні описано процес спеціалізації нейронної мережі на розпізнаванні об'єктів за специфічними характеристиками або в умовах з обмеженими ресурсами. Після навчання мережа використовується для ідентифікації та сегментації визначених об'єктів на зображеннях. Зібрані результати розпізнавання підлягають агрегуванню, що дозволяє інтегрувати інформацію з різних джерел, тим самим підвищуючи загальну точність системи. Запропоновані методи можуть слугувати основою для розробки та вдосконалення алгоритмів розпізнавання об'єктів у різних прикладних завданнях, таких як мобільна робототехніка, моніторинг та аналіз середовища. Актуальність роботи обумовлена потребою підвищення стабільності та точності роботи систем розпізнавання об'єктів у складних умовах, зокрема при наявності обмежених і низькоякісних навчальних даних. Отримані результати та підходи можуть бути застосовані для вирішення практичних завдань і підтримки подальших досліджень у цій галузі.

Ключові слова: розпізнавання об'єктів, нейронні мережі, датасети, обробка даних, анотація зображень.

The article analyzes key aspects of the formation of training datasets, including images of objects, for training artificial neural networks, in particular on the YOLO platform, which is widely used for recognition tasks. The subject of the study is the process of identifying and classifying objects associated with track scenarios, such as track robots, barriers and track surfaces. The article presents an approach to creating two-dimensional images with the appropriate annotation of the classes "robots", "track" and "barriers". Particular attention is paid to data augmentation methods that allow increasing the variability and improving the quality of training samples, which is critically important for the effectiveness of training neural networks. The study describes the process of specializing a neural network in recognizing objects by specific characteristics or in conditions with limited resources. After training, the network is used to identify and segment certain objects in images. The collected recognition results are subject to aggregation, which allows integrating information from different sources, thereby increasing the overall accuracy of the system. The proposed methods can serve as the basis for developing and improving object recognition algorithms in various applied tasks, such as mobile robotics, monitoring and environmental analysis. The relevance of the work is due to the need to increase the stability and accuracy of object recognition systems in difficult conditions, in particular in the presence of limited and low-quality training data. The obtained results and approaches can be applied to solve practical problems and support further research in this area.

Keywords: object recognition, neural networks, datasets, data processing, image annotation.

Вступ

Щоб моделі машинного навчання могли розпізнавати об'єкти категорій "automodel", "road" і "border", необхідно ретельно опрацьовувати процес створення навчальних датасетів, включаючи двовимірні зображення. Для цього

використовують фотографії та відео, які містять відповідні об'єкти, зняті за різних умов [1]. Важливим аспектом є забезпечення різноманітності даних: зображення повинні містити різні види автомоделей, елементи трас і перепон. Це дає змогу моделі пристосовуватися до змін

у параметрах освітлення, кутах огляду та навколишньому середовищі, що значно підвищує її ефективність у реальних сценаріях.

Теоретичне обґрунтування

У найпростішому випадку доцільно обмежити наявну варіативність об'єктів розпізнавання трьома класами.

Клас "automodel" включає широкий спектр конфігурацій і типів автомобільних моделей, що можуть відрізнятися за розмірами, формами та кольорами. Для забезпечення ефективного навчання моделі необхідно включити до датасетів зображення з різноманітними варіаціями цих об'єктів, враховуючи їхній контекст і різні кути огляду. Категорія "road" охоплює зображення трас і шляхів, які характеризуються різними типами покриття та умовами освітлення. Важливо, щоб модель навчилася розпізнавати ці об'єкти навіть у ситуаціях, коли доріжка є частково прихованою або має нечіткі межі.

Клас "border" охоплює різні види перепон, які можуть бути виготовлені з таких матеріалів, як метал, пластик або дерево, і мати різноманітні форми.

Таким чином, датасети формуються за трьома основними напрямками: "automodel", "road" і "border". Кожна категорія поділяється на підгрупи, які містять детальний опис особливостей об'єктів та умов їхнього розташування.

У свою чергу, підкатегорія "автомодель" включає зображення автомобілів, розміщених на трасі.



Рисунок 1 – Розділення класу "automodel" на підкатегорії

Наступна ключова категорія, "road", включає різноманітні види зображень трас.



Рисунок 2 – Розділення класу "road" на підкатегорії

Категорія "перепона" включає об'єкти траси, що слугують для обмеження траєкторії руху автомобільних моделей.



Рисунок 3 – Розділення класу "border" на підкатегорії

Запропонована структура гарантує точність у процесі ідентифікації та класифікації зображень в датасеті, що сприяє покращенню аналізу та обробки даних для завдань розпізнавання й класифікації. Для полегшення розуміння, цей процес можна представити у вигляді схеми, де кожен рівень деталізації демонструє підкатегорії та їх взаємозв'язки.

Методика експерименту

Анотація є одним з основних етапів підготовки датасетів. Для кожного класу об'єктів необхідно точно позначити їх місце розташування на зображеннях, використовуючи рамки (bounding box),

полігональні контури або точкові маски в залежності від вимог задачі. Наприклад, для класу "automodel" доцільно застосовувати полігональні розмітки, оскільки це дозволяє точніше відобразити складні контури автомобільних моделей, тоді як для класів track та barrier можуть бути достатніми рамки, що визначають межі об'єктів.

Коли датасет обмежений у розмірі або має низьку якість, важливо використовувати техніки аугментації для поліпшення навчання моделі [1]. Аугментація дозволяє штучно збільшити кількість даних, застосовуючи різноманітні трансформації зображень, такі як зміна кута зйомки, коригування яскравості та контрасту, а також застосування інших геометричних і кольорових модифікацій. Для класів "automodel", "road" і "border" це може включати варіації в умовах та якості освітлення, додавання, спотворень, шумів або зміну фону.

Ще одним підходом, який застосовується для малих датасетів, є перенесене навчання [2,3]. Моделі, попередньо навчені на великих датасетах, таких як ImageNet, вже володіють загальними знаннями про ознаки об'єктів, що дозволяє адаптувати їх для конкретних задач, таких як розпізнавання автомобільних моделей, трас або перешкод. Цей метод значно зменшує потребу в нових даних і пришвидшує процес навчання.

Для поліпшення якості підготовки даних, зображення було завантажено на платформу RoboFlow [4], що значно полегшує їх обробку для завдань машинного навчання. Після цього було виконано детальну анотацію об'єктів на кожному зображенні, включаючи моделі авто, перешкоди та елементи дороги. Анотація полягала в точному визначенні меж (bounding boxes) для кожного об'єкта, приклад чого представлений на рис. 4, а також у присвоєнні відповідних класів.

З врахуванням ситуації, коли початкові дані були обмеженими і мали низьку якість, було ухвалено рішення застосувати

методи аугментації для збільшення кількості та різноманітності зображень у датасеті. Аугментація включала трансформації зображень, такі як обертання, масштабування, горизонтальні та вертикальні відображення, зсуви, а також зміну параметрів яскравості, контрасту та насиченості [5,6]. Ці методи дозволили нейронній мережі стати більш стійкою до змін у вхідних даних і покращити її здатність до узагальнення на обмеженому наборі прикладів. В результаті аугментації розмір датасету значно зріс, що позитивно вплинуло на ефективність навчання мережі.



Рисунок 4 – Приклад анотованого зображення

Після завершення анотації та застосування методів аугментації, проведено розділення датасету на три окремі фрагменти: 88% для тренувального набору, 8% для валідаційного та 4% для тестового. Така структура розподілу була обрана для максимального використання наявних даних для навчання мережі, водночас забезпечуючи достатню кількість даних для перевірки та тестування. Тренувальна частина використовувалася для безпосереднього навчання моделі, що дозволяло їй виявляти шаблони та характеристики об'єктів. Валідаційна частина слугувала для контролю процесу навчання та налаштування гіперпараметрів, що допомагало уникнути перенавчання та покращити здатність моделі до узагальнення. Тестова частина використовувалася для остаточної оцінки

ефективності моделі на нових даних, що дало змогу отримати точні показники її продуктивності.

Інформацію про розподіл даних, а також характеристики попередньої обробки та аугментації для створеного датасету можна побачити на рис. 5.

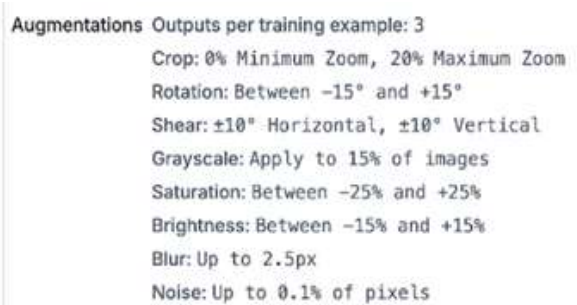


Рисунок 5 – Методи трансформації, застосовані до датасету

Для перевірки ефективності використаного датасету та оцінки результатів навчання нейронної мережі задіяно її тренування засобами платформи RoboFlow. Після завершення навчання були отримані статистичні показники, які відображають точність і якість нейронної мережі, що дозволило оцінити доцільність застосування датасету для вирішення поставленої задачі.

Зокрема, на рисунку 6 представлено графік, що демонструє зміни метрики середньої точності (mean Average Precision, mAP) в процесі навчання за послідовними епохами. Вісь абсцис показує кількість епох, на яких мережа проходила тренування на основному наборі даних, а вісь ординат відображає значення mAP, яке є оцінкою ефективності нейронної мережі щодо виявлення та класифікації об'єктів на основі отриманих двомірних зображень.

Графік відображає дві основні криві. Темно-фіолетова крива (mAP@50) демонструє швидке зростання середньої точності на перших 50 епохах, після чого вона стабільно утримується в межах 0.9–1.0, що свідчить про високу результативність мережі.

Світло-фіолетова крива (mAP@50:95) має менші значення, але також досягає

стабільності близько 0.7, що є позитивним показником.

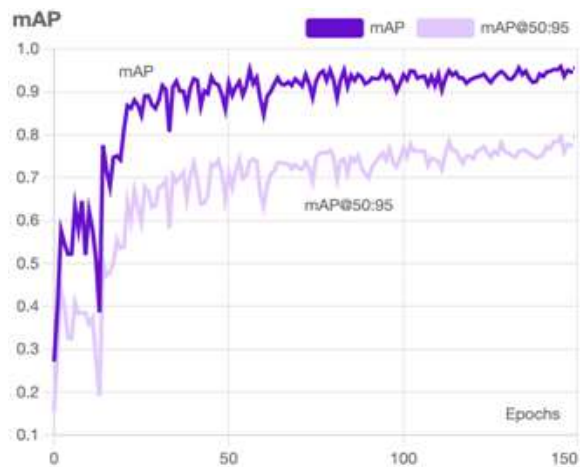


Рисунок 6 – Залежність середньої точності розпізнавання від тривалості навчання

Загальна картина вказує на те, що обидві метрики стабілізуються на високому рівні після початкового зростання. Значення функції втрат для об'єктних рамок (Box Loss) під час тренування для виявлення об'єктів наведено на рисунку 7.

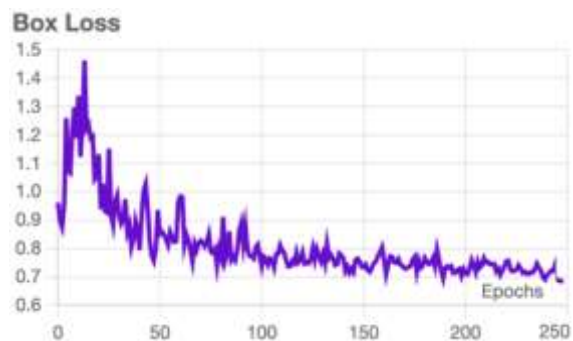


Рисунок 7 – Значення функції втрат для рамок об'єктів (Box Loss) при тренуванні мережі

На графіку вісь абсцис відповідає за кількість епох навчання, в той час як вісь ординат відображає Box Loss, який оцінює похибки у прогнозуванні координат обмежувальних рамок; чим менше значення, тим вища точність моделі. У перші 50 епох значення Box Loss знижується з 1.5 до 0.9–1.0, що свідчить про помітне покращення. Після 50 епох цей показник стабілізується та поступово знижується до рівня 0.7–0.8. Коли досягається 200 епох, коливання

практично зникають, і значення Box Loss стабільно тримаються на рівні 0.7, що вказує на зрілість процесу навчання. Графік свідчить про успішний тренінг, а різке зниження і стабілізація після 100 епох підтверджують, що мережа здатна точно передбачати рамки об'єктів.

На рисунку 8 наведено графік втрат класифікації (Class Loss) під час навчання.

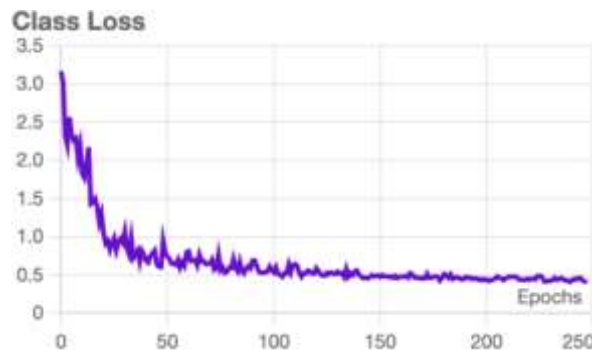


Рисунок 8 – Значення функції втрат для класифікації об'єктів (Class Loss) при тренуванні мережі

Показник Class Loss відображає ефективність процесу класифікації об'єктів на різних етапах навчання: чим менше значення, тим вища точність класифікації. Як і у попередньому графіку, вісь X демонструє кількість епох навчання, а вісь Y — рівень втрат класифікації. На початковому етапі навчання значення Class Loss починає з високих показників (приблизно 3.0), що є типовим для початку тренування.

Протягом перших 50 епох цей показник швидко знижується, досягнувши значення нижче 1.0, що вказує на суттєве покращення здатності мережі до класифікації.

Після 50 епох спостерігається стабільність, коли значення Class Loss стабільно коливається близько 0.5 і не змінюється помітно після 100 епох. Швидке зниження втрат у початковий період (0–50 епох) свідчить про ефективне освоєння класифікації об'єктів з початковими втратами 3.0, які зменшуються до приблизно 0.5. Стабілізація після 100 епох підтверджує, що мережа досягла стабільних результатів і ефективно класифікує об'єкти.

На рисунку 9 наведено графіки, що показують зміни в метриках точності (Precision) та повноти (Recall) протягом 300 епох навчання мережі. Обидві ці метрики є важливими для оцінки продуктивності мереж у задачах класифікації та виявлення об'єктів.

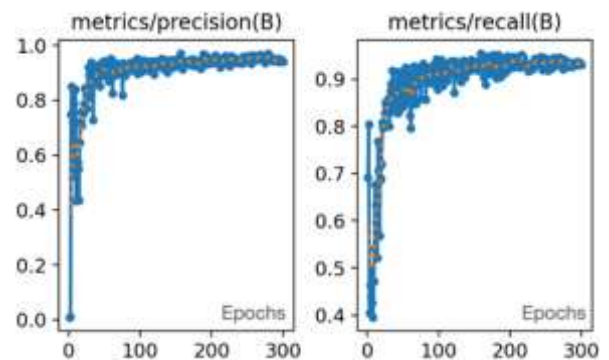


Рисунок 9 – Значення точності (Precision) та повноти (Recall) при тренуванні мережі

На першому графіку, як можна побачити, відображено зміни точності мережі: на осі абсцис — кількість епох, що характеризує процес навчання, а на осі ординат — рівень точності, який розраховується як частка правильно передбачених позитивних класів серед усіх передбачених позитивних класів.

Спочатку точність низька, але швидко підвищується, досягнувши значення близько 0.9 після перших 50 епох, і залишається стабільною в діапазоні 0.9–1.0 до завершення навчання.

Синя лінія з точками представляє фактичні показники точності на кожній епосі, тоді як помаранчева пунктирна лінія візуалізує згладжене значення для відображення загальної тенденції.

На другому графіку, як можна побачити, демонструється зміна повноти мережі: на осі X — кількість епох, а на осі Y — значення повноти, яке визначається як частка правильно класифікованих позитивних класів серед усіх реальних позитивних класів.

Як і в першому графіку, на початкових етапах повнота низька, але швидко зростає протягом перших 50 епох. Після 100 епох значення Recall стабілізується, коливаючись близько 0.9, що свідчить про

здатність мережі правильно класифікувати більшість позитивних класів.

Синя лінія з точками відображає фактичні показники, а помаранчева пунктирна лінія відображає згладжене значення для візуалізації загальної тенденції.

Висновки

Згідно з проведеним аналізом, мережа відображає значне покращення в обох метриках на початкових етапах тренування, швидко освоюючи класифікацію об'єктів і зменшуючи кількість помилкових прогнозів. Після 100 епох точність і повнота досягають значень близько 0.9–1.0, що свідчить про стабільну і ефективну роботу моделі. Малі флуктуації можуть бути пов'язані з особливостями складності даних або з більш складними зображеннями для класифікації.

У процесі підготовки датасету було важливо звернути увагу на якість даних. Початково зображення мали низьку якість, але завдяки детальній анотації та аугментації вдалося створити більш збалансований і різноманітний датасет.

Також важливо стежити за рівномірним розподілом класів об'єктів серед всіх частин датасету, щоб уникнути зміщення моделі на конкретні класи.

Список використаних джерел / References

1. Nanthini K., Sivabalaselvamani D. and oth. A Survey on Data Augmentation. 2023 7th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC), Erode, India, 2023. pp. 913-920. DOI: [10.1109/ICCMC56507.2023.10084010](https://doi.org/10.1109/ICCMC56507.2023.10084010).

2. Rogers A. W. and oth. A transfer learning approach for predictive modeling of bioprocesses using small data. *Biotechnology and Bioengineering*. 2021. Vol. 119, № 2. P. 411–422. DOI: [10.1002/bit.27980](https://doi.org/10.1002/bit.27980)

3. Gürsakal N., Çelik S., Birişçi E. Synthetic Data Generation with Python. *Synthetic Data for Deep Learning*.

Berkeley, CA, 2022. С. 159–214. DOI: [10.1007/978-1-4842-8587-9_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-8587-9_5)

4. Roboflow: Computer vision tools for developers and enterprises. *Roboflow: Computer vision tools for developers and enterprises*. URL: <https://roboflow.com/>

5. Huang L. Normalization Techniques in Deep Learning. Cham: Springer International Publishing, 2022. DOI: [10.1007/978-3-031-14595-7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14595-7)

6. A Review on Imbalanced Data Handling Using Undersampling and Oversampling Technique. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*. 2017. Т. 3, № 4. С. 444–449. DOI: [10.23883/ijrter.2017.3168.0uwxm](https://doi.org/10.23883/ijrter.2017.3168.0uwxm)

DATASETS PREPARATION FEATURES FOR TRAINING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

I. S. Yakovyn¹, R. T. Krasnyak¹,
A. A. Shkitov², R. P. Tomashivskiy¹

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine; e-mail: igor.com.2009@gmail.com, roman.krasnyak@gmail.com

²Open International University of Human Development "Ukraine"; 23 Lvivska St., Kyiv, 03115, Ukraine; e-mail: office@uu.ua

УДК 004.032

DOI 10.31471/1993-9981-2024-1(52)-121-128

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ, НАВЧЕНИХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЕЙ ЗМАГАЛЬНИХ АТАК

О. В. Мойсеєнко

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, e-mail: olena.moiseienko@nung.edu.ua*

У статті проведено детальний аналіз ефективності змагального навчання для підвищення стійкості нейронних мереж до атак зловмисників у завданнях розпізнавання зображень. Розглянуто питання уразливості нейронних мереж, зокрема їхню схильність до помилкової класифікації під впливом змагальних прикладів, створених спеціально для обману моделі. Дослідження спрямоване на розробку методів навчання, які підвищують стійкість моделей до різних типів атак, зберігаючи при цьому високу якість класифікації чистих зразків. У роботі встановлено, що традиційні підходи до навчання мереж, орієнтовані на протидію лише одному типу атаки, є недостатніми для забезпечення загальної стійкості моделі. Для досягнення комплексного захисту було запропоновано використання декількох типів змагальних прикладів (FGSM, JSMA, C&W). Це дозволяє моделі формувати більш стійкі до атак уявлення даних. З метою оцінювання ефективності запропонованого підходу було проведено серію експериментів з використанням набору даних MNIST, який містить 60000 тренувальних і 10000 тестових зображень у градаціях сірого. Результати досліджень показали, що змагальне навчання значно покращує стійкість моделі до атак. Зокрема, середня точність класифікації для різних типів атак підвищується до 97,48%–97,95%, а застосування розширення даних додатково збільшує точність до 99,42%. Водночас незахищені моделі без доповнення даних демонструють вищу точність лише для окремих атак, але загальна їхня стійкість залишається низькою. Запропонований підхід також дозволяє знизити середню ефективність атак на 29,2%, при цьому зберігаючи високу точність класифікації (98,9%) для чистих зразків. Для оцінювання впливу змагального навчання була використана комбінація метрик, що враховують не лише точність класифікації, але й стійкість моделі до атак. Виявлено, що змагальне навчання сприяє покращенню узагальнюючих властивостей моделі, що дозволяє зменшити вразливість до різноманітних зловмисних введень, створених за допомогою різних атакуювальних алгоритмів.

Ключові слова: Змагальні атаки, змагальний тренінг, нейронна мережа, машинне навчання, FGSM, C&W, JSMA, атака методом чорної скриньки.

The article provides a detailed analysis of the effectiveness of adversarial learning to increase the resistance of neural networks to attacks by attackers in image recognition tasks. The issue of vulnerability of neural networks is considered, in particular, their tendency to misclassification under the influence of adversarial examples created specifically to deceive the model. The research is aimed at developing training methods that increase the resistance of models to various types of attacks, while maintaining high quality classification of clean samples. The work found that traditional approaches to network training, focused on countering only one type of attack, are insufficient to ensure the overall stability of the model. To achieve comprehensive protection, the use of several types of adversarial examples (FGSM, JSMA, C&W) was proposed. This allows the model to form more resistant representations of data to attacks. In order to evaluate the effectiveness of the proposed approach, a series of experiments were conducted using the MNIST dataset, which contains 60,000 training and 10,000 test images in grayscale. The research results showed that adversarial learning significantly improves the model's resistance to attacks. In particular, the average classification accuracy for different types of attacks increases to 97.48%–97.95%, and the use of data augmentation further increases the accuracy to 99.42%. At the same time, unprotected models without data augmentation demonstrate higher accuracy only for individual attacks, but their overall robustness remains low. The proposed approach also allows to reduce the average attack efficiency by 29.2%, while maintaining high classification accuracy (98.9%) for pure samples. To assess the impact of adversarial learning, a combination of metrics was used that take into account not only classification accuracy, but also the model's robustness to attacks. It was found that adversarial learning contributes to improving the generalization properties of the model, which allows to reduce vulnerability to various malicious inputs created using different attack algorithms.

Keywords: Competitive attacks, competitive training, neural network, machine learning, FGSM, C&W, JSMA, black box attack.

Вступ

Нейронні мережі активно застосовуються дослідниками завдяки їх численним перевагам у різноманітних додатках. Вони ефективно працюють із складними багатовимірними даними, такими як зображення, відео, звукові сигнали та інші.

Однак останні дослідження показали, що нейронні мережі, включаючи найсучасніші моделі машинного навчання, вразливі до так званих «змагальних атак» [1]. Це ситуації, коли мережа робить неправильні висновки щодо даних, які дуже схожі на коректні. Крім того, було виявлено, що різні типи нейронних мереж, навіть із різними архітектурами та навчанням на різних наборах даних, схильні до однакових помилок у таких змагальних прикладах. Це свідчить про наявність фундаментальних недоліків у підходах до навчання цих моделей.

Хоча спочатку причини виникнення змагальних атак були невідомі, існують теорії, які пояснюють їх появу. Серед можливих причин називають нелінійність глибоких нейронних мереж, недоліки моделі усереднення або недостатню регуляризацію під час навчання.

Нейронні мережі, незважаючи на свою високу ефективність, залишаються вразливими до різних видів змагальних атак. Основні слабкі місця обумовлені їхньою залежністю від вхідних даних і архітектури мережі. Зокрема, вони схильні до зловмисних атак із використанням збурень, які залишаються непомітними навіть для людського ока. Це становить серйозну загрозу безпеці та викликає труднощі в реалізації програм на їх основі. У зв'язку з цим розробка ефективних методів і механізмів кіберзахисту є нагальною необхідністю.

Метою дослідження є підвищення стійкості нейронних мереж для розпізнавання зображень до кібератак. Це передбачається досягти шляхом навчання моделей із використанням сценаріїв можливих змагальних атак, а також аналізу впливу структури мережі та стратегії атак на її продуктивність.

Теоретичне обґрунтування

Оскільки вразливість нейронних мереж до атак підтверджена, дослідники активно працюють над розробкою методів, які підвищують їх стійкість до агресивних впливів. Попри численні запропоновані рішення, більшість із них виявилися недостатньо ефективними, оскільки нові методи атак або модифікації існуючих можуть обходити захисні механізми та успішно обманювати мережі [2]. Серед різних підходів найбільш перспективним виявився метод змагального навчання, який демонструє високі результати у підвищенні стійкості моделей.

Наша ідея полягає у використанні змагального навчання для підготовки мережі до протидії різним типам змагальних атак. Оскільки тренування мережі з урахуванням лише одного типу атак може збільшити її вразливість до інших видів змагальних прикладів, ми пропонуємо створити методику, яка забезпечить стійкість до кількох типів атак одночасно.

Метою розробки є створення ефективної моделі змагального навчання, яка зробить нейронну мережу менш уразливою до змагальних атак.

Для кращого моделювання сутності змагальної атаки розглядаємо приклад із задачі навчання з учителем в задачах класифікації. У цій задачі використовуються пари «об'єкт-мітка», за якими мережа навчається передбачати значення для нових об'єктів.

Якщо розглядати задачу класифікації з геометричної точки зору, метою є розділення простору таким чином, щоб новий об'єкт належав до «правильного» класу. За умови доступу до генеральної сукупності даних і роздільності класів ідеальну гіперплощину можна було б провести точно. Однак, оскільки генеральна сукупність зазвичай недоступна, використовуються алгоритми машинного навчання для наближення до цієї «ідеальної» гіперплощини на основі доступних даних.

Будь-яке відхилення цієї гіперплощини від ідеальної створює «зазор», в якому об'єкти можуть бути класифіковані некоректно. Завдання атакуючого полягає в тому, щоб змінити вектор параметрів об'єкта так, щоб він потрапив у цей зазор і був класифікований неправильно.

Змагальне навчання є одним із методів протидії таким атакам. Це підхід, у якому використовується альтернативна цільова функція для забезпечення узагальнення моделі як для звичайних, так і для змагальних даних. У нашому дослідженні ми зосереджуємося на змагальному навчанні як засобі підвищення захисних властивостей і надійності моделей машинного навчання.

У багатьох реальних умовах зловмисники можуть використовувати лише атаки типу «чорної скриньки», оскільки параметри моделі зазвичай залишаються закритими постачальником послуг. Окрім того, постійне тестування моделей може бути витратним як за часом, так і за ресурсами [3]. В таких умовах атакуючий може тренувати власну модель, імітуючи цільову мережу, та використовувати її для створення змагальних прикладів. Ці приклади потім передаються до захищеної мережі з надією, що вона зробить помилкову класифікацію.

Для розробки ефективної моделі навчання ми припускаємо, що зловмисник прагне змусити класифікатор неправильно класифікувати вхідні дані, зарахувавши їх до будь-якого класу, окрім правильного. Для цього розглядається слабкий супротивник, який має доступ лише до вихідних даних нейронної мережі.

Зловмисник не володіє інформацією про архітектуру мережі, включаючи кількість, тип і розмір шарів, а також не має доступу до навчальних даних, використаних для налаштування її параметрів. Така ситуація відповідає класичній атаці типу «чорної скриньки», коли зловмиснику не потрібно знати внутрішню структуру системи для того, щоб спотворити її роботу.

Цільова модель. У нашому дослідженні припускається, що метою зловмисника є багатокласовий класифікатор нейронної мережі. Така модель виводить вектори ймовірностей, де кожен компонент вектора представляє ймовірність, що вхідні дані належать до одного з попередньо визначених класів. Завдання класифікатора полягає у виборі класу з найвищою ймовірністю, тоді як зловмисник прагне змінити вхідні дані так, щоб класифікатор зробив неправильний вибір.

Щоб оцінити ефективність змагального навчання у захисті від різних типів змагальних атак, ми тренуємо нейронну мережу за допомогою змагальних прикладів, створених різними відомими методами атак. Після навчання різних моделей, кожна з яких тренувалася на певному наборі змагальних прикладів, проводимо атаки чорної скриньки на ці мережі, використовуючи різні методи атак. Потім аналізуємо, наскільки успішно кожна мережа класифікує спотворені зображення.

Рівень успішності атак визначає, наскільки ефективною є атака в обмані моделі, шляхом кількісної оцінки частки атак, які досягли успіху. Він показує, у скількох випадках змагальним прикладам вдалося змусити модель машинного навчання зробити неправильну класифікацію або викликати несподівану поведінку.

Точність моделі використовується для загальної оцінки її ефективності. Вона визначається як частка правильно класифікованих екземплярів (як позитивних, так і негативних) відносно загальної кількості екземплярів. Це дає змогу зрозуміти, наскільки добре модель справляється зі звичайними й спотвореними даними, що є ключовим показником її надійності в умовах атак.

$$\text{Вдалі атаки (\%)} = \frac{(\text{К-ть вдалих атак})}{(\text{Загальна к-ть атак})} * 100\%$$

$$\text{Точність} = \frac{w+x}{w+x+y+z},$$

де w , x , y і z вказує на істинно-негативний (TN), істинно-позитивний (TP), хибно-

негативний (FN) і хибно-позитивний (FP) результати кібератаки відповідно.

Методика експерименту

Хоча змагальні приклади можна створювати з нуля, зазвичай вони формуються шляхом модифікації оригінальної вибірки таким чином, щоб цільова мережа неправильно класифікувала змінені дані. У цьому дослідженні для моделювання використано загальнодоступну базу даних MNIST, а також змагальні приклади, згенеровані трьома різними методами атак: FGSM, JSMA та методом Карліні-Вагнера (C&W).

Ці методи були обрані через те, що, хоча всі вони мають однакову мету - створити змагальні приклади, - їхні підходи до генерації даних відрізняються, що забезпечує різноманітність зображень.

«Хороший» змагальний приклад для навчання нейронної мережі - це зображення, яке візуально майже не відрізняється від оригінального, але мережа його класифікує неправильно. Використання таких прикладів у процесі навчання дозволяє моделі краще протистояти спотворенням і підвищує її стійкість до атак.

Змагальний тренінг. Припустімо, що зловмисник намагається створити змагальні приклади для обману класифікатора нейронної мережі зі зловмисною метою, наприклад, для обходу автентифікації. У реальних умовах зловмисник зазвичай не має доступу до параметрів цільової мережі. Крім того, перевірка мережі шляхом випробування великої кількості вхідних даних і спостереження за її результатами може бути обмеженою через технічні чи ресурсні причини.

Тому більш реалістичною атакою є атака чорної скриньки (або сірої скриньки), за якої зловмисник не володіє інформацією про параметри цільової мережі. У моделі атаки, розглянутій у цій роботі, передбачається, що зловмисник знає точну або приблизну архітектуру мережі, але не має доступу до її параметрів.

Для здійснення атаки зловмисник спочатку тренує власну нейронну мережу, яка має таку ж або подібну архітектуру, як і цільова мережа. Після цього на основі своєї моделі він генерує змагальні приклади, використовуючи обраний алгоритм атаки. Ці приклади потім застосовуються до цільової мережі з метою обману її класифікатора. Такий підхід дозволяє зловмиснику здійснювати атаку навіть за відсутності детальної інформації про внутрішні параметри цільової мережі.

У рамках цієї моделі атаки ми аналізуємо вплив змагального навчання на стійкість до атак. Як базу даних використовуємо MNIST [4], який є простим і широко вживаним набором даних для оцінки продуктивності алгоритмів машинного навчання. Для цільових нейронних мереж обрано дві відомі моделі: LeNet5 і ResNet. Ці ж моделі, найімовірніше, застосовуються зловмисником для створення змагальних прикладів.

Для створення змагальних прикладів атак використовуємо три алгоритми: FGSM, JSMA та C&W, як зазначалося раніше.

Процес навчання:

- для кожної з нейронних мереж проводиться навчання декількох моделей з різними наборами даних;

- одна модель навчається виключно на чистих даних із навчального набору;

- інші моделі проходять змагальне навчання, у межах якого до чистих даних додаються змагальні приклади. Наприклад, при навчанні моделі за допомогою FGSM до кожного чистого зразка з навчального набору створюється відповідний змагальний приклад. У результаті навчальний набір збільшується вдвічі порівняно з початковим.

Параметри атак:

- для FGSM використовується параметр ϵ , який визначає максимальну зміну кожного пікселя між оригінальним зразком і його змагальним прикладом.

У таблиці 1 наведено детальні параметри, які використовуються для

Таблиця 1 - Параметри для алгоритмів атаки та час для генерації змагальних прикладів

Алгоритм атаки	Параметри	Час генерації 60000 змагальних прикладів	
		LeNet5	ResNet
FGSM (L_∞)	$\epsilon = 0,2$	48	66
JSMA (L_0)	$\theta = 1,0,$ $\gamma = 0,2$	2226	9180
C&W (L_2)	conf.: 5	8142	49,542

кожного алгоритму атаки. Ці параметри дозволяють оцінити вплив різних стратегій атак і змагального навчання на продуктивність моделей нейронних мереж.

У методі C&W (Карліні-Вагнера) параметр, який визначає рівень достовірності (confidence), відповідає за ступінь модифікації зображення. Цей параметр контролює, наскільки сильно змагальний приклад змінює оригінальне зображення для того, щоб спричинити неправильну класифікацію.

Високе значення достовірності означає, що змагальний приклад буде значно відрізнятися від оригіналу, що збільшить ймовірність того, що мережа неправильно класифікує зображення. Однак таке сильне спотворення зробить зображення менш схожим на оригінал і більш очевидним для людського спостерігача. Низьке значення достовірності дозволяє мінімізувати зміну зображення, роблячи його більш схожим на оригінал, але ймовірність того, що зображення буде неправильно класифіковане, зменшується.

Тому зловмисник може налаштувати цей параметр для досягнення бажаного балансу між ефективністю атаки (правильна класифікація) і сприйнятливістю зображення до людського ока.

Для обох моделей, LeNet5 і ResNet, використовується оптимізатор Adam із швидкістю навчання 0,0001. Процес навчання триває 50 епох для LeNet5 і 100 епох для ResNet.

Щоб компенсувати недостатню кількість даних, під час навчання часто застосовують методи доповнення даних через випадкові перетворення. Ми також

використовуємо такі підходи, як випадкове обертання, зміщення та стирання. Зокрема, у кожній епосі зображення в навчальному наборі можуть випадково обертатися на кут у діапазоні $[-20, 20]$ градусів, а також зміщуватися в будь-якому з чотирьох напрямків максимум на 6 пікселів (близько 20% ширини та висоти зображення). У випадку випадкового стирання видаляється прямокутна область довільного розміру, що охоплює до 30% пікселів.

Під час змагального тренування обертання та зміщення застосовуються лише до чистих зображень, а не до змагальних прикладів..

Стійкість мережі LeNet5

У таблиці 2 представлено результати тестування точності мереж LeNet5, навчених із різними комбінаціями чистих і змагальних прикладів. Для кожного тестового набору наведено середню та максимальну точність, отриману в проміжку між 20-ю та 50-ю епохами.

Наприклад, мережа, навчена лише на чистих зображеннях, досягає максимальної точності 99,42% на чистих тестових зразках. Однак її точність на змагальних прикладах, створених методами FGSM, JSMA та C&W, становить лише 50,23%, 64,07% і 55,28% відповідно. Це свідчить про те, що без врахування змагальних прикладів мережа легко піддається атакам, що значно знижує її точність.

Якщо мережа навчена змагальності за допомогою одного набору змагальних прикладів, вона ефективно класифікує зразки, створені цим самим методом, але не може впоратися з іншими типами атак. Наприклад, навчання на прикладах FGSM дозволяє мережі протистояти атакам FGSM, але не атакам JSMA або C&W.

Таблиця 2 - Точність тестування LeNet5 (20 - 50 епох, мережа навчається за допомогою доповнення даних, включаючи випадкове обертання, випадкове зміщення і випадкове стирання)

Навчена модель	Максимум				Медіана			
	чистий	FGSM	JSMA	C&W	чистий	FGSM	JSMA	C&W
чистий	99,42	50,23	64,07	55,28	99,23	42,01	61,06	46,07
FGSM	99,40	99,31	63,90	75,67	99,24	99,27	60,34	65,08
JSMA	99,42	50,35	96,75	81,20	99,30	48,46	96,35	75,02
C&W	99,37	74,12	69,00	99,57	99,22	61,17	63,30	99,31
FGSM + JSMA	99,40	99,32	96,29	90,05	99,28	99,26	95,15	84,94
FGSM + C&W	99,43	99,32	65,27	99,65	99,24	99,26	62,96	99,42
JSMA + C&W	99,43	73,98	96,70	98,99	99,35	70,71	95,83	98,58
FGSM + JSMA + C&W	99,36	99,30	95,82	98,81	99,27	99,21	94,92	98,39

Таблиця 3 – Точність тестування ResNet18

(40 - 100 епох (мережа навчається за допомогою доповнення даних, включаючи випадкове обертання, випадкове зміщення і випадкове стирання))

Навчена модель	Максимум				Медіана			
	чистий	FGSM	JSMA	C&W	чистий	FGSM	JSMA	C&W
чистий	99,68	70,69	80,70	93,27	99,50	65,30	76,82	91,54
FGSM	99,65	95,92	78,40	97,51	99,56	92,24	73,53	96,69
JSMA	99,66	78,71	97,78	96,13	99,56	73,85	96,80	95,42
C&W	99,62	88,99	81,37	98,60	99,52	85,71	76,29	98,11
FGSM + JSMA	99,65	95,34	96,34	98,05	99,54	93,80	95,34	97,53
FGSM + C&W	99,67	97,54	77,87	98,79	99,57	96,59	75,14	98,38
JSMA + C&W	99,69	89,80	97,00	98,63	99,56	86,57	95,57	98,25
FGSM + JSMA + C&W	99,63	97,57	96,68	98,84	99,51	96,58	95,37	98,44

Навчання на двох наборах змагальних прикладів, таких як FGSM і C&W, робить мережу стійкою до атак, створених цими методами, але вона залишається вразливою до змагальних прикладів, згенерованих іншими методами (наприклад, JSMA).

Нарешті, мережа, навчена з використанням чистих зразків разом із прикладами FGSM, JSMA та C&W, демонструє високу точність на всіх трьох типах змагальних прикладів, зберігаючи при цьому високу точність класифікації чистих зразків. Завдяки додаванню більшої кількості змагальних прикладів і розширенню навчального набору мережа може стати ще надійнішою.

Продуктивність мережі ResNet18

Оскільки результати можуть залежати від архітектури нейронної мережі, ми повторили експеримент для моделі ResNet18. На відміну від LeNet5, яка має 648,226 параметрів, ResNet18 значно

більша за розміром із 11,175,370 параметрами. Загальновідомо, що ResNet18 краще справляється з навчанням складних функцій на зображеннях. У цьому експерименті як захисник, так і зловмисник використовували власні моделі ResNet18 для створення змагальних прикладів. Стратегія збільшення даних залишалася такою ж, як і для LeNet5.

Оскільки ResNet18 потребує більше епох для зближення, її навчання тривало 100 епох, а результати точності тестування оцінювалися в період між 40-ю і 100-ю епохами. Результати наведено в таблиці 3.

Як і у випадку з LeNet5, незахищена ResNet18 демонструє значно нижчу точність на змагальних прикладах (FGSM, JSMA та C&W) порівняно з чистими тестовими зображеннями. При навчанні на змагальних прикладах, створених певним методом, мережа стає стійкою до атак цього ж методу.

Змагальне навчання з використанням кількох наборів змагальних прикладів забезпечує надійність мережі, зберігаючи високу точність для чистих тестових даних. У порівнянні з LeNet5, ResNet18 демонструє вищу надійність, навіть коли не використовується змагальне навчання. Наприклад, точність для FGSM-зразків у LeNet5 становить приблизно 50%, тоді як у ResNet18 вона досягає 70%. Аналогічне підвищення точності спостерігається для інших методів атак.

Таким чином, можна зробити висновок, що без використання змагальності структура моделі та кількість її параметрів відіграють важливу роль у надійності мережі. Проте, при застосуванні змагального навчання точність класифікації змагальних прикладів у LeNet5 та ResNet18 стає приблизно однаковою.

Висновки

Запропонована модель навчання значно підвищує стійкість нейронних мереж до атак. Результати показують, що мережа, навчена протистояти певному методу атаки, здебільшого ефективна лише проти цього конкретного методу, але залишається вразливою до інших типів атак.

Доведено, що змагальне навчання з кількома типами змагальних прикладів дозволяє досягти високої точності для кожного з методів атак. Однак інші фактори, наприклад, різні стратегії захисту або атаки, можуть впливати на загальну надійність моделі. Наприклад, якщо захисник використовує доповнення даних у процесі навчання, а зловмисник ні, то точність мережі при атаках FGSM може суттєво знижуватися.

Загалом змагальне навчання не гарантує 100% захисту від усіх типів атак, зокрема атак «чорної скриньки», де доступ до цільової мережі обмежений. Експерименти показують, що мережа, навчена на двох типах змагальних прикладів (наприклад, FGSM і C&W), ефективно протистоїть цим методам, але

залишається вразливою до інших атак, таких як JSMA. Мережа, навчена з використанням чистих даних, FGSM, JSMA та C&W, демонструє високу точність проти всіх трьох методів атак, зберігаючи при цьому високу точність класифікації чистих даних.

При створенні більшої кількості змагальних прикладів і використанні збільшеного набору даних мережа досягає більшої надійності. Наприклад, точність виявлення атак для мережі, навченої трьома методами (FGSM, JSMA, C&W), становить у середньому 97,48% і 97,95% для різних типів мереж. Застосування методів розширення даних може підвищити точність до 99,42%.

Однак мережа, яка не захищена і навчена без доповнення даних, показує вищу точність для змагальних прикладів усіх трьох методів атак. Модель змагального навчання загалом знижує рівень ефективності атак у середньому на 29,2% для різних зловмисних введів, при цьому точність класифікації чистих зразків у базі даних MNIST залишається високою — 98,9%.

Список використаних джерел / References

1. Moosavi-Dezfooli S.M., Fawzi A., Frossard P. Deepfool: A simple and accurate method to fool deep neural networks. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016, pp. 2574–2582.
2. Papernot N., McDaniel P., Jha S., Fredrikson, M., Celik Z.B., Swami, A. The limitations of deep learning in adversarial settings. *In Proceedings of the 2016 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P)*, Saarbrücken, Germany, 21–24 March 2016, pp. 372–387.
3. Madry A., Makelov A., Schmidt L., Tsipras, D., Vladu A. Towards Deep Learning Models Resistant to Adversarial Attacks. arXiv 2018, arXiv:1706.06083.

4. Schott L., Rauber J., Bethge M., Brendel W. Towards the first adversarially robust neural network model on MNIST . arXiv 2019, arXiv:1805.09190/

5. Schmidt L., Santurkar S., Tsipras D., Talwar K., Madry A. Adversarially robust generalization requires more data. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2018, 31, 5014–5026.

1. Tramèr F., Boneh D. Adversarial training and robustness for multiple perturbations. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2019, 32, 5866–5876.

7 Guo C., Gardner, J.R., You Y., Wilson A.G., Weinberger K.Q. Simple Black-box Adversarial Attacks. arXiv 2019, arXiv:1905.07121.

9 LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proc. IEEE* 1998, 86, 2278–2324.

10 Chen P.Y., Sharma Y., Zhang H., Yi J., Hsieh C.J. EAD: Elastic-Net Attacks to Deep Neural Networks via Adversarial Examples. *In Proceedings of the Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-18)*, New Orleans, LA, USA, 2–7 February 2018.

11 Kurakin A., Goodfellow I., Bengio S. Adversarial examples in the physical world. arXiv 2017, arXiv:1607.02533.

12 Dong Y., Liao F., Pang T., Su H., Zhu, J., Hu X., Li J. Boosting Adversarial Attacks with Momentum. *In Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Salt Lake City, UT, USA, 18–23 June 2018, pp. 9185–9193.

RESEARCH ON THE STABILITY OF NEURAL NETWORKS TRAINED USING COMPETITIVE ATTACK MODELS

O. V. Moiseienko

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas; Ivano-Frankivsk, Karpatska Str., 15, 76019, Ukraine, e-mail: olena.moiseienko@nung.edu.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

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.