

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

*Журнал заснований у 1918 році*

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ  
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

**Серія: Технічні науки**

**Том 31 (70) № 3 2020**

**Частина 1**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2020

## **Головний редактор:**

**Кисельов Володимир Борисович** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

## **Члени редакційної колегії:**

**Медведєв Микола Георгійович** (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Бронін Сергій Вадимович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

**Домніч Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Дехтяр Анатолій Соломонович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;

**Дичко Аліна Олегівна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Дубко Валерій Олексійович** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технологій та дизайну;

**Єремєєв Ігор Семенович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Лисенко Олександр Іванович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Огородник Станіслав Станіславович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Сегай Олександр Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Чумаченко Сергій Миколайович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

**Цомко Олена** – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet  
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського  
(протокол № 9 від 05.06.2020 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідчення про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

**ISSN 2663-5941 (Print)**

**ISSN 2663-595X (Online)**

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2020

## ЗМІСТ

### ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

Борисенко В.Д., Устенко С.А., Устенко І.В. МОДИФІКАЦІЯ ЛЕМНІСКАТИ БЕРНУЛЛІ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ.....	1
---	---

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ І ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ РЕЧОВИН У РУХОМИХ РОБОЧИХ ЄМКОСТЯХ (ЧАСТИНА 2: ТИПИ ОБЛАДНАННЯ З РУХОМИМИ ЄМКОСТЯМИ).....	7
Кальченко В.І., Кальченко В.В., Венжега В.І., Винник В.О., Скляр В.М., Кальченко Д.В. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ КУЛАЧКІВ РОЗПОДІЛЬНОГО ВАЛА ПЕРИФЕРІСЮ ОРІЄТОВАНОГО ІНСТРУМЕНТА НА МОДЕРНІЗОВАНОМУ ВЕРСТАТІ В3208Ф4.....	13
Кальченко В.І., Кальченко В.В., Венжега В.І., Винник В.О., Скляр В.М., Кальченко Д.В. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ КУЛАЧКІВ РОЗПОДІЛЬНОГО ВАЛА НА МОДЕРНІЗОВАНОМУ ВЕРСТАТІ В3208Ф4.....	19

### АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Березанський В.Г., Березанський О.Г., Баранік О.М., Константинов А.О., Свінцицький В.В. ПІДХІД МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ СНАРЯДІВ АВІАЦІЙНИХ ПАТРОНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ УЗАГАЛЬНЕНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ.....	25
Нечипоренко О.М. СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ВИСОТИ ПОЛЬОТУ КВАДРОКОПТЕРА ПІДВИЩЕНОЇ НАДІЙНОСТІ.....	32

### ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Chemerys V.T. ANALYSIS OF SOME DESIGN SOLUTIONS OF ELECTROMAGNETIC SCREENS FOR COMPENSATION OF THE LEAKAGE FLUX IN THE ROTATING COMPRESSION GENERATOR OF PULSED CURRENT.....	40
---	----

### РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Михалевський Д.В., Городецька О.С. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ АРХІТЕКТУРНИХ ПЕРЕШКОД НА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ БЕЗПРОВІДНОГО КАНАЛУ СТАНДАРТУ 802.11.....	48
Новіков В.І., Лисенко О.І., Валуйський С.В., Гуйда О.Г. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ МОБІЛЬНИМИ СЕНСОРАМИ Й ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ.....	54
Орлов А.Т., Трапезон К.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ІНФРАЗВУКОВИХ СЕНСОРІВ У РАЗІ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	65
Переверзєв О.А., Гумен Т.Ф., Трапезон К.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LPWAN У СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ОХОРОНИ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ.....	71

## **ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ**

**Бабкін А.А., Кудін О.В.**

ОГЛЯД НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ ВТОРГНЕНЬ.....77

**Боділовський О.К.**

ВИБІР ОБЛАСТІ ІНТЕРЕСУ В РАЗІ БЕЗКОНТАКТНОГО МОНІТОРИНГУ  
ПАРАМЕТРІВ ДИХАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СЕМАНТИЧНОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ.....83

**Власенко О.В., Єфремов Ю.М., Оринчак І.А.**

ІШТУЧНИЙ РОЗУМ І ІШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗАДАЧІ.....90

**Гончар С.Ф.**

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ КІБЕРБЕЗПЕКИ  
ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ SMART GRID.....97

**Жихаревич В.В., Шумиляк Л.М., Остапов С.Е., Д'яченко Л.І., Миронів І.В.**

КЛІТИННО-АВТОМАТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ,  
ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС КРИСТАЛІЗАЦІЇ СПЛАВІВ.....102

**Залужна Г.В., Нефьодова І.В.**

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНИХ ВІДЕОРОЛІКІВ  
ДЛЯ РЕКЛАМНОЇ КАМПАНІЇ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....109

**Концур В.О., Беглов К.В.**

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ГРУПИ КОТЛІВ  
ПІД ЧАС СПАЛЮВАННЯ НЕСЕРТИФІКОВАНОГО ПАЛИВА.....115

**Кравченко С.М., Гришкун Є.О., Власенко О.В.**

МЕТОДИ КЛАСИФІКАЦІЇ МАШИННОГО НАВЧАННЯ  
З ВИКОРИСТАННЯМ БІБЛІОТЕКИ SCIKIT-LEARN.....121

**Левкін Д.А., Макаров О.А., Завгородній О.І., Левкін А.В.**

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОТОЧКОВИХ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ .....126

**Романюк Л.А., Чихіра І.В.**

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ  
БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ.....131

**Шілінг А.Ю.**

ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАПОВНЕННЯ ДИСЦИПЛІН  
ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ВІДПОВІДНО ДО СТАНДАРТУ ISO/IEC-25010.....136

## **ЕНЕРГЕТИКА**

**Калінчик В.П., Калінчик В.В.**

ОРГАНІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ТРАКТУ  
ВИМІРЮВАННЯ Й ОБЛІКУ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ.....143

**Коваленко Г.В.**

ТЕПЛОВІДДАЧА ПІД ЧАС НЕСТАЦІОНАРНОГО НУКЛЕАТИВНОГО КИПІННЯ НАНОРІДИН  
ІЗ МАЛОТЕПЛОПРОВІДНОЮ ТВЕРДОЮ ФАЗОЮ.....149

**Сінчук О.М., Бойко С.М., Некрасов А.В., Ножнова М.О., Федь М.М.**

ДО ПИТАННЯ ПРОЄКТУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ  
В УМОВАХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ.....153

**Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Грановська О.О., Мороз О.С., Старченко О.С.**

ПУСКОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБІЛІЗАТОРНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ  
ПРИ ПОДАЧІ ГАЗОВОГО ПАЛИВА В ЗОНУ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ.....158



## **РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН**

**Рязанцев М.О., Носач О.К., Рязанцев А.М.**

ПРИЧИНИ ТА МЕХАНІЗМ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....167

**Сергієнко О.І., Когтєва О.П., Уваров М.О.**

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В'ЯЗКО-ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ  
ОДНОРІДНОГО МАСИВУ НАВКОЛО ОДИНОЧНОЇ ВИРОБКИ.....179

## **МЕТАЛУРГІЯ**

**Кухар В.В., Курпе О.Г.**

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЧОРНОВОЇ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ.....185

**Тарасов В.К., Воденнікова О.С., Куріс Ю.В., Матяшева Ю.Б.,**

**Воденнікова Л.В., Бабошко Д.Ю.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХОДІВ ЩОДО ПОЛІПШЕННЯ УМОВ ПРАЦІ  
В ЦЕХАХ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ.....191

**ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....197**

# CONTENTS

## APPLIED GEOMETRY, ENGINEERING GRAPHICS AND ERGONOMICS

**Borisenko V.D., Ustenko S.A., Ustenko I.V.**

MODIFICATION OF THE BERNOULLI'S LEMNISCATE AND ITS PRACTICAL APPLICATION .....1

## INDUSTRIAL ENGINEERING

**Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Malyshev V.V.**

PERSPECTIVE TECHNOLOGIES FOR PART PROCESSING

AND MIXING OF BULK MATTERS INTO MOBILE WORKING TANKS

(PART 2: TYPES OF EQUIPMENT WITH CAPACITIES MOVEMENT).....7

**Kalchenko V.I., Kalchenko V.V., Wenzhega V.I., Vinnik V.A., Sklar V.M., Morochko V.V.**

RESEARCH PROCESS OF SPEED MILLING OF CAMSHAFT ROLLS IN THE PERIPHERY

OF THE ORIENTED TOOL ON THE MODERNIZED MACHINE WZ208F3 .....13

**Kalchenko V.I., Kalchenko V.V., Wenzhega V.I., Vinnik V.A., Sklar V.M., Morochko V.V.**

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HIGH-SPEED MILLING SHAFT ROLLS

ON MODERNIZED VZ208F4 MACHINE .....19

## AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

**Berezanskyi V.G., Berezanskyi O.G., Baranik O.M., Konstantinov A.O., Svintsitskyi V.V.**

APPROACH TO MODELING CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF AVIATION

AMMUNITION SHEARS USING THE GENERALIZED PARAMETRIC METHOD .....25

**Nechyporenko O.M.**

HIGHLY RELIABLE MEASUREMENT SYSTEM

OF FLIGHT ALTITUDE OF A QUADROCOPTER .....32

## ELECTRICAL ENGINEERING

**Chemerys V.T.**

ANALYSIS OF SOME DESIGN SOLUTIONS OF ELECTROMAGNETIC SCREENS

FOR COMPENSATION OF THE LEAKAGE FLUX IN THE ROTATING

COMPRESSION GENERATOR OF PULSED CURRENT.....40

## RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

**Mykhalevskiy D.V., Horodetska O.S.**

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ASSESSING THE IMPACT

OF ARCHITECTURAL OBSTACLES ON THE BASIC PARAMETERS

OF THE WIRELESS CHANNEL OF 802.11 STANDARD.....48

**Novikov V.I., Lysenko O.I., Valuyskyy S.V., Guida O.H.**

MATHEMATICAL MODELS, METHODS AND ALGORITHMS

FOR OPTIMIZING PERFORMANCE OF THE WIRELESS SENSOR NETWORKS

WITH MOBILE SENSORS AND TELECOMMUNICATION AIR PLATFORMS.....54

**Orlov A.T., Trapezon K.O.**

INVESTIGATION OF FEATURES OF INFRASOUND SENSORS

IN THE DETECTION OF AIR OBJECTS.....65

**Pereverziev O.A., Humen T.F., Trapezon K.O.**

RESEARCH OF FEATURES OF USING LPWAN TECHNOLOGY

IN MODERN HOUSEHOLD SECURITY SYSTEMS .....71

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

**Babkin A.A., Kudin O.V.**

AN OVERVIEW OF NEURAL NET MODELS FOR INTRUSION DETECTION SYSTEM.....77

**Bodilovskyi O.K.**

SELECTION OF REGION OF INTEREST IN NON-CONTACT MONITORING OF RESPIRATION  
PARAMETERS USING SEMANTIC SEGMENTATION .....83

**Vlasenko O.V., Iefremov Yu.M., Orynychak I.A.**

ARTIFICIAL MIND AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE, PRESENTATION OF TASK .....90

**Honchar S.F.**

METHOD FOR RISK ASSESSMENT OF CYBERSECURITY  
OF INFORMATION SYSTEMS OF SMART GRID.....97

**Zhikharevich V.V., Shumylyak L.M., Ostapov S.E., Diachenko L.I., Myroniv I.V.**

CELLULAR AUTOMATA SIMULATION OF THERMAL PROCESSES  
WHEN ALLOYS CRYSTALLIZATION .....102

**Zaluzhna G.V., Nefodova I.V.**

DEVELOPMENT OF INFORMATION VIDEOS FOR THE ADVERTISING CAMPAIGN  
OF HIGHER EDUCATION .....109

**Kontsur V.O., Beglov K.V.**

OPTIMIZATION OF BOILER GROUP OPERATING  
MODE DURING COMBUSTION OF NON-CERTIFIED FUEL.....115

**Kravchenko S.N., Grishkun E.O., Vlasenko O.V.**

CLASSIFICATION METHODS FOR MACHINE LEARNING USING  
THE SCIKIT-LEARN LIBRARY .....121

**Levkin D.A., Makarov O.A., Zavgorodniy A.I., Levkin A.V.**

THE THEORETICAL RESEARCH OF MULTI-POINT BOUNDARY TASKS.....126

**Romaniuk L.A., Chykhira I.V.**

AUTOMATED AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM OF UNMANNED AERIAL VEHICLES .....131

**Shilinh A.Yu.**

EVALUATION THE QUALITY OF DISTANCE LEARNING  
DISCIPLINES' INFORMATION CONTENT IN ACCORDANCE TO ISO / IEC-25010 STANDARD.....136

## POWER ENGINEERING

**Kalinchyk V.P., Kalinchyk V.V.**

ORGANIZATION OF INFORMATION LINKS  
OF ENERGY MEASUREMENT AND ACCOUNTING TRACT .....143

**Kovalenko G.V.**

HEAT TRANSFER ON NON-STATIONARY NUCLEATIVE BOILING  
OF NANOFLUIDS WITH A SOLID PHASE HAVING A LOW HEAT CONDUCTIVITY.....149

**Sinchuk O.M., Boiko S.M., Nekrasov A.V., Noznova M.O., Fed M.M.**

ON THE DESIGN OF WIND POWER PLANTS IN THE CONDITIONS OF MINING ENTERPRISES .....153

**Chernousenko O.Yu., Butovsky L.S., Hranovska O.O., Moroz O.S., Starchenko O.S.**

STARTING CHARACTERISTICS OF STABILIZER BURNING DEVICES  
WHEN FUEL GAS SUPPLY IN THE RECIRCULATION ZONE .....158

## RESOURCE DEVELOPMENT

**Riazantsev M.O., Nosach O.K., Riazantsev A.M.**

CAUSES AND MECHANISM OF ROCK DREAKING .....167

**Serhienko O.I., Kohtieva O.P., Uvarov M.O.**

NUMERICAL MODELING OF VISCO-ELASTIC DEFORMATION OF A HOMOGENEOUS  
MASSIF AROUND OF A SINGLE WORKING SPACE .....179

**METALLURGY**

**Kukhar V.V., Kurpe O.H.**

PHYSICAL SIMULATION OF THE HOT ROUGHING  
ROLLING POWER PROCESSES .....185

**Tarasov V.K., Vodennikova O.S., Kuris Yu.V., Matyasheva O.B.,**

**Vodennikova L.V., Babochko D.Yu.**

RESEARCH OF MEASURES TO IMPROVE WORKING CONDITIONS  
IN COLD ROLLING SHOPS .....191

**INFORMATION ABOUT AUTHORS.....197**

# ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

УДК 514.18

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/01>

**Борисенко В.Д.**

Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського

**Устенко С.А.**

Одеський національний політехнічний університет

**Устенко І.В.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## МОДИФІКАЦІЯ ЛЕМНІСКАТИ БЕРНУЛЛІ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Стаття присвячена розробленню методу модифікації лемніскати Бернуллі з метою забезпечення заданих кутів нахилу дотичних у початковій і кінцевій точках ділянки лемніскати, розташованій у ділянці додатних значень абсцис та ординат ортогональної системи координат, а також проведення кривої через проміжну точку. Звичайна лемніската має на початку координат кут нахилу дотичної, рівний  $45^\circ$ . У точці перетину пелюстки лемніскати з віссю абсцис ортогональних координат дотична до неї розташовується перпендикулярно до цієї осі. Для модифікації лемніскати введені два параметри, один із яких є степенем кореня, а другий є деяким раціональним додатним або від'ємним числом, але таким, що не призводить до від'ємного значення косинуса, що знаходиться під знаком кореня. Зміна кута нахилу дотичної в початковій точці реалізується введенням під знак кореня додаткової компоненти. Розроблено метод проведення дуги модифікованої лемніскати через точку, задану в площині розташування лемніскати з довільними кутами нахилу дотичних у початковій і кінцевій точках модельованої дуги модифікованої лемніскати. Метод застосовано до розрахунку координат перехідної кривої, яка влаштовується між прямолінійною та круговою ділянками залізничного шляху. Задача розв'язується за умови, що модельована крива буде дотичною до прямолінійної та кругової рейок, а в точці стикування з круговою ділянкою мати в ній кривину, рівну оберненій величині радіуса кола кругової рейки. Наведені результати моделювання тестового прикладу перехідної кривої залізничного шляху, які підтвердили працездатність розробленого методу модифікації лемніскати Бернуллі. Запропонований метод модифікації лемніскати реалізовано у вигляді комп'ютерного коду, який дає змогу, окрім числових результатів, отримувати графічні зображення модельованих кривих на екрані монітора комп'ютера.

**Ключові слова:** лемніската Бернуллі, модифікація, дотична, кривина, перехідна крива.

**Постановка проблеми.** Рівняння лемніскати вперше в математичній літературі зустрілося в 1694 році в статті Я. Бернуллі про приливи та відливи. Я. Бернуллі відзначив схожість цієї лінії з цифрою 8 і з вузловою пов'язкою, яку він називав «лемніск» (від грецького – пов'язка). Звідси й впливає назва цієї поширеної в практичному застосуванні кривої.

Лемніската Бернуллі в ортогональних координатах описується рівнянням четвертого порядку вигляду

$$(x^2 + y^2)^2 = a(x^2 - y^2).$$

Характеристична властивість лемніскати Бернуллі полягає в тому, що ця крива є геометричним місцем точок  $M$ , добуток відстаней від яких до двох фіксованих точок  $F_1$  і  $F_2$  (так званих фокусів) є величиною сталою й дорівнює квадрату половини відстані між фокусами.

Лемніската Бернуллі складається з двох пелюсток. Початок ортогональних координат, у яких вона побудована, є для неї подвійною точкою з дотичними  $y = \pm x$ . Ці дотичні є асимптотами кривої, вони взаємно перпендикулярні.

Отже, лемніската Бернуллі є кривою четвертого порядку, вона має вигляд лежачої вісімки.

Її дуже часто називають символом нескінченності.

Плоскі алгебраїчні лінії вищих порядків мають широке практичне застосування. Серед цих кривих провідне місце посідає лемніската Бернуллі. Лемніскатні криві поширені в багатьох галузях науки й техніки, зокрема під час профілювання лопаток осьових і радіальних турбін, середніх ліній профілів лопаток осьових компресорів, вхідних патрубків аеродинамічних труб, побудови перехідних кривих, які влаштовуються між прямолінійними й круговими ділянками залізничних та автомобільних шляхів. Ці криві мають привабливі переваги, зумовлені монотонністю зміни кривини, кута нахилу дотичної вздовж обводу.

Проте лемніскатним кривим притаманні й певні недоліки. Так, на початку ортогональної системи координат пелюстка лемніскати має кут нахилу дотичної, який дорівнює  $45^\circ$ , а в точці, що знаходиться на перетині лемніскати з віссю абсцис, цей кут є рівним  $90^\circ$ . Ця обставина суттєво обмежує сферу застосування лемніскат, оскільки на практиці часто буває необхідним забезпечувати різноманітні комбінації кутів нахилу дотичних у вказаних точках. У зв'язку з викладеним необхідно розробити заходи, пов'язані з подоланням цих недоліків.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Однією з класичних публікацій, присвячених аналітичному огляду плоских кривих, є робота А.А. Савелова [1]. У цій праці достатньо уваги приділено опису властивостей лемніскати Бернуллі, які є численними та різноманітними. Низку цікавих властивостей лемніскати пов'язують із її квадратурою, кривиною, визначенням довжини дуги від полярного кута, рівного нулю, до деякого заданого його значення, показано, що інверсія лемніскати дає синусоїдальну спіраль. Методи побудови лемніскати графічними способами розглядаються в роботі [2].

Жоден довідник із вищої математики [3; 4] не обходить питання плоских кривих, розгляду їх властивостей та особливостей. У цих виданнях обов'язково приділяється певна увага лемніскаті Бернуллі.

Завершуючи аналіз літературних джерел, необхідно зазначити, що питання модифікації рівняння лемніскати Бернуллі не розглядається. Тільки в роботі [5] стосовно профілів лопаток осьових турбін пропонується змінювати кут нахилу дотичної до лемніскати на початку ортогональних координат шляхом множення ординат точок лемніс-

кати на коефіцієнт, який є функцією кута виходу потоку з решітки профілів.

**Постановка завдання.** Метою статті є розроблення заходів, пов'язаних із забезпеченням потрібних кутів нахилу дотичних до лемніскати шляхом модифікації певним чином її рівняння в полярній системі координат, зокрема зміни показника степеня, коефіцієнта при полярному куті та додавання до рівняння спеціального компонента.

Виклад основного матеріалу дослідження. Рівняння лемніскати в полярних координатах має вигляд:

$$\rho = a\sqrt{\cos(2\phi)},$$

де  $\rho$ ,  $\phi$  – полярні радіус і кут;  $a$  – параметр лемніскати, який визначає координати найбільш віддалених точок лемніскати на осі  $x$ .

Ця крива в початковій точці ортогональних координат має кут нахилу дотичної, рівний  $45^\circ$ , а на відстані  $a$  від початку – цей кут дорівнює  $90^\circ$ . Але в деяких практичних застосуваннях необхідно забезпечувати різноманітні комбінації кутів нахилу дотичних в означених точках.

Модифікуємо рівняння лемніскати й запишемо його в такому вигляді:

$$\rho = a^m\sqrt{\cos(n\phi)},$$

де  $m$  і  $n$  – параметри.

Параметр  $n$  має визначатися залежно від потрібного кута нахилу дотичної до лемніскати на початку ортогональної системи координат. Він знаходиться як величина, що дорівнює результату ділення  $90^\circ$  на значення потрібного кута нахилу дотичної, тобто

$$n = 90/\alpha_0,$$

де  $\alpha_0$  – кут нахилу дотичної, який береться в градусах.

Для зміни кута нахилу дотичної в початковій точці введемо під знак кореня додаткову компоненту  $\Delta$ . За цих дій модифіковане рівняння лемніскати набуде вигляду:

$$\rho = a^m\sqrt{\cos(n\phi) + \Delta}.$$

Додаткова компонента має задовольняти таким умовам: у початковій точці лемніскати  $\Delta = 0$ ; у кінцевій точці – підкореневий вираз  $\cos(n\phi) + \Delta = 0$ . Означеним умовам задовольняє вираз:

$$\Delta = -\operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1)\sin(n\phi).$$

При  $n\phi = 0$  величина  $\Delta = 0$ , а при  $n\phi = \pi - \alpha_1$  підкореневий вираз

Остаточно рівняння модифікованої лемніскати візьмемо у вигляді:

$$\rho = a^m \sqrt{\cos(n\phi) - \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \sin(n\phi)}. \quad (1)$$

Це рівняння дає змогу будувати лемніскати з різними комбінаціями кутів нахилу дотичних у початковій і кінцевій точках модельованої лінії.

На рис. 1 показані три модифіковані лемніскати, побудовані за рівнянням (1). На ньому зображені дві прямі, дотичні до початкової та кінцевої точок кривої. Лемніскати моделювалися з кутами  $\alpha_1 = -60^\circ$  у початковій точці кривої і  $\alpha_0 = 75^\circ$  у кінцевій її точці. Параметр  $m$  для кривої 1 мав значення 1,25; для кривої 2 – 1,50; для кривої 3 – 1,75.

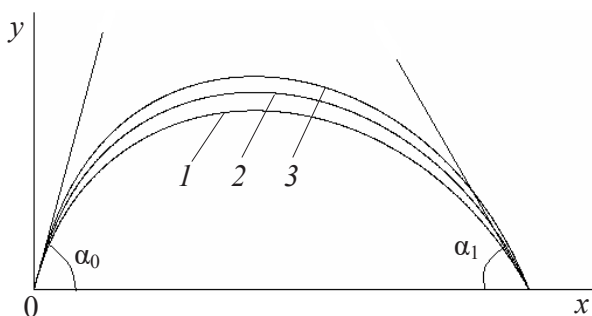


Рис. 1. Модифіковані дуги лемніска

Відомо, що кут нахилу дотичної до кривої пов'язаний із похідною від рівняння, яким описується крива. Похідна параметричної функції  $dy/dx$  є результатом ділення похідної  $dy/d\phi$  на похідну  $dx/d\phi$ .

Ортогональні координати будь-якої точки полярно заданої кривої є добутком полярного радіуса на відповідну тригонометричну функцію полярного кута. Диференціюємо ці залежності й отримуємо вираз для похідної  $dy/dx$ :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\rho' \sin \phi + \rho \cos \phi}{\rho' \cos \phi - \rho \sin \phi}. \quad (2)$$

Полярний радіус  $\rho$  модифікованої лемніскати визначається залежністю (1), яку для зручності запишемо у вигляді:

$$\rho = a [\cos(n\phi) - \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \sin(n\phi)]^{\frac{1}{m}}. \quad (3)$$

Для розрахунку похідної  $dy/dx$  за виразом (2) необхідно мати похідну  $\rho'$ . Знайдемо цю похідну,

для чого продиференціюємо залежність (3) по полярному куту  $\phi$ . Будемо мати:

$$\rho' = \frac{-na}{m} [\cos(n\phi) - \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \sin(n\phi)]^{\frac{1-m}{m}} \times [\sin(n\phi) + \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \cos(n\phi)]. \quad (4)$$

Підставивши (3) і (4) до формули (2), отримаємо вираз для розрахунку похідної.

Розглянемо задачу, пов'язану з проведенням дуги модифікованої лемніскати через точку, довільно задану в площині розташування лемніскати. Основним питанням у розв'язанні цієї задачі є визначення параметра  $m$ .

Абсцису деякої заданої точки  $A$  можна подати так:

$$x_A = a^m \sqrt{\cos(n\phi_A) - \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \sin(n\phi_A)} \cos \phi_A. \quad (5)$$

Полярний кут  $\phi_A$  точки  $A$  визначається за формулою:

$$\phi_A = \arctg \frac{y_A}{x_A}.$$

Логарифмуючи (5), після перетворень отримаємо вираз для визначення параметра  $m$ :

$$m = \frac{\ln [\cos(n\phi_A) - \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \sin(n\phi_A)]}{\ln \frac{x_A}{a \cos \phi_A}}. \quad (6)$$

Кривина кривої  $k$ , заданої в полярних координатах, визначається за такою формулою:

$$k = \frac{\rho^2 + 2(\rho')^2 - \rho \rho''}{[\rho^2 + (\rho')^2]^{\frac{3}{2}}}. \quad (7)$$

Для знаходження першої похідної  $\rho'$  запишемо рівняння модифікованої лемніскати (1) у вигляді:

$$\rho^m = a^m [\cos(n\phi) - \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \sin(n\phi)].$$

Диференціюванням обох частин цього рівняння по  $\phi$  отримаємо:

$$m \rho^{m-1} \rho' = -na^m [\sin(n\phi) + \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \cos(n\phi)],$$

звідки

$$\rho' = -\frac{na^m [\sin(n\phi) + \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \cos(n\phi)]}{m \rho^{m-1}}. \quad (8)$$



Для знаходження другої похідної  $\rho''$  диференціюємо вираз (8) по  $\phi$ :

$$m(m-1)\rho^{m-2}\rho' + m\rho^{m-1}\rho'' = -n^2 a^m [\cos(n\phi) - \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \sin(n\phi)].$$

Після перетворень цей вираз набуде вигляду

$$\rho'' = -\frac{m(m-1)\rho^{m-2}\rho' + n^2 a^m [\cos(n\phi) - \operatorname{ctg}(\pi - \alpha_1) \sin(n\phi)]}{m\rho^{m-1}}. \quad (9)$$

Застосуємо модифіковану лемніскату до моделювання перехідних кривих залізничних колій, найбільш проблемними місцями яких є криві ділянки шляху. Особливу роль відіграє перехідна крива, вставкою якої забезпечується плавність переходу від прямолінійної ділянки до кругової.

Перехідні криві повинні задовольняти таким вимогам [6, 7]: на початку перехідної кривої, розташованому в кінці прямолінійної ділянки, радіус кривини повинен відповідати нескінченності, а потім, поступово зменшуючись, наближатися до радіуса кривини кругової ділянки.

Отже, головні вимоги, які подаються до перехідної кривої, полягають у тому, щоб на її початку кривина  $k$  дорівнювала нулю (для виключення удару), а на кінці величині  $-1/R$  (для зменшення впливу відцентрових сил).

На рис. 2 цифрою 1 позначено прямолінійну ділянку шляху, цифрою 2 – кругову ділянку радіуса  $R$ , цифрою 3 – перехідну криву.

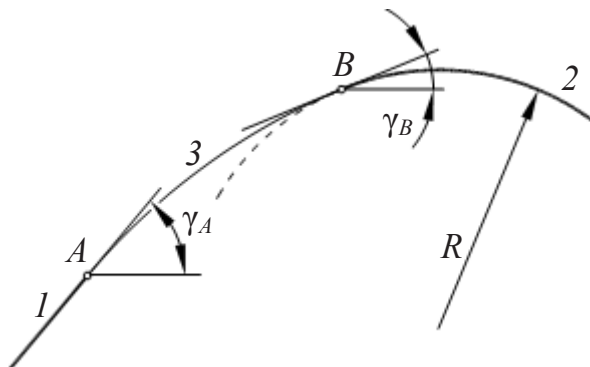


Рис. 2. Перехідна крива між прямою та круговою ділянками шляху

Застосуємо для побудови перехідної кривої модифіковану лемніскату у вигляді (1). Ця крива на початку ортогональних координат має нульове значення кривини, що є привабливим для стикування її в цій точці з прямолінійною ділянкою залізничного шляху.

За початок координат візьмемо точку стикування прямолінійної ділянки шляху з модифіко-

ваною лемніскатою. У цій системі координат розташуємо коло кругової ділянки шляху. При цьому будуть задані радіус кола  $R$  та координати його центра  $x_C, y_C$ .

Для розв'язання поставленої задачі необхідно підібрати модифіковану лемніскату так, щоб вона пройшла дотично до прямолінійної та кругової ділянок шляху. Це можна зробити, якщо якимось чином знайти значення параметра лемніскати  $a$ , показник кореня  $m$ , параметр  $n$  та кут  $\alpha_1$ .

Указані параметри й кут  $\alpha_1$  визначаються в такій послідовності. Задаємося величиною кута  $\gamma_B$ . Оскільки координати  $x_C, y_C$  центра кола кругової ділянки та її радіус  $R$  задані, то можна розраховувати проміжні значення координат точки  $B$ :

$$x_B = x_C - R \sin \gamma_B;$$

$$y_B = y_C + R \cos \gamma_B.$$

За відомими координатами точки  $B$  визначаємо її полярний кут:

$$\phi_B = \arctg\left(\frac{y_B}{x_B}\right).$$

Знаходження невідомих величин, необхідних для побудови перехідної кривої, яка подаватиметься модифікованою лемніскатою, виконано шляхом розв'язання оптимізаційної задачі з чотирма параметрами. Для цього застосовано високоефективний алгоритм Хука-Дживса [8], розроблений для мінімізації функцій багатьох змінних, перевагою якого є те, що в процесі мінімізації не використовуються похідні від цільової функції по параметрах, що оптимізуються..

У задачі, що розв'язується, існують два критерії. Перехідна крива, яка вийшла з точки  $A$ , має прийти в точку  $B$ , бути в ній дотичною до кола кругової ділянки та мати однакову з колом кривину. Оскільки існують два критерії, то задача належить до класу багатокритеріальних. Для її розв'язання застосовано принцип Гермейєра [9], який передбачає використання для цільової функції єдиного показника  $Q$ , у якому складникам цільової функції приписують різну вагу  $\lambda_i$ :

$$Q = \sum_1^2 \lambda_i W_i;$$

$$\sum_1^2 \lambda_i = 1.$$

Цільова функція в нашій задачі має вигляд:

$$Q = \lambda_1 |\gamma_B - \arctg \theta_B| + \lambda_2 |k_B - 1/R|.$$

У цій цільовій функції під кутом  $\theta_B$  розуміється кут нахилу модифікованої лемніскати до осі абсцис у точці  $B$ , розрахований як арктангенс похідної, визначеної за виразом (2), оскільки кут береться в ортогональних координатах, а під  $k_B$  – кривина модифікованої лемніскати в точці  $B$ , яка обчислюється за виразом (7).

Для розрахунку цільової функції виконуються такі дії:

- за відомим кутом нахилу прямої рейки розраховується параметр  $n$ ;
- за виразом (6) знаходиться показник кореня  $m$ ;
- за виразом (2) розраховується похідна в точці  $B$ ;
- на підставі розрахованої похідної знаходиться кут нахилу дотичної в точці  $B$ , що дає можливість знайти першу компоненту цільової функції, пов'язану з визначенням різниці кутів нахилу дотичних у точці  $B$ ;

– за виразом (7) розраховується кривина модифікованої лемніскати в точці  $B$ ;

– визначається друга компонента цільової функції, яка пов'язана зі знаходженням різниці кривини, отриманої за виразом (7), та оберненою величиною радіуса кола кругової ділянки шляху.

Сформувавши цільову функцію, розв'язують оптимізаційну задачу. Отримані при цьому результати тестового прикладу в графічному вигляді представлені на рис. 3. На цьому рисунку цифрою 1 позначено прямолінійну ділянку шляху, продовження якої свідчить про те, що перехідна крива є дотичною до прямолінійної ділянки. Цифрою 2 на рисунку позначено кругову ділянку шляху радіуса  $R$ , цифрою 3 – отриману за результатами розрахунків перехідну криву, цифрою 4 – графік розподілу кривини модифікованої лемніскатної кривої, цифрою 5 – дотичну до кола кругової ділянки та перехідної кривої в точці  $B$ , у якій стикуються вказані лінії.

Аналізуючи графік розподілу кривини перехідної кривої, можна відмітити, що на початку цієї кривої кривина дорівнює нулю. По мірі пере-

міщення по перехідній кривій кривина спочатку поступово зростає, потім стабілізується. Але при наближенні до точки стикування з круговою кривою кривина дещо знижується, що призводить до незначного гальмування транспортного засобу. І цей факт є позитивним.

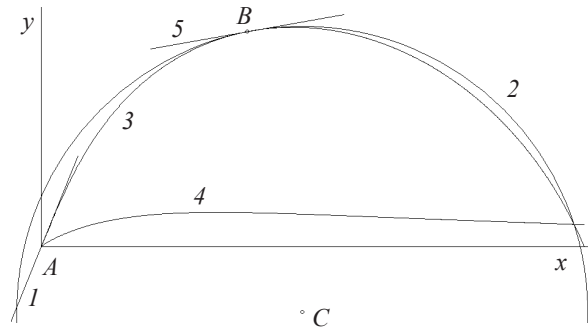


Рис. 3. Тестовий приклад побудови перехідної кривої між прямолінійною та круговою ділянками шляху

Запропонований метод моделювання перехідних кривих може бути застосованим під час побудови автомобільних шляхів, хоча, на відміну від залізничного шляху, для автомобільних доріг треба враховувати рельєф місцевості, якому призначенні спуски та підйоми шляху, розташовані часто на невеликій відстані.

**Висновки.** Запропонований метод модифікації лемніскати Бернуллі дає змогу моделювати дуги цих кривих із заданими комбінаціями кутів у початкових і кінцевих точках. Показано, що за цим методом можна визначити величини застосованих під час модифікації лемніскати параметрів і цим самим забезпечувати проходження кривої через задану проміжну точку площини.

Практичною реалізацією доведено, що модифіковані лемніскати можна застосовувати під час геометричного моделювання перехідних кривих, які влаштовуються між прямою та круговою ділянками залізничного шляху.

#### Список літератури:

1. Савелов А.А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применения (справочное руководство). Москва : УРСС, 2010. 296 с.
2. Lockwood E.H. A book of curves. Cambridge : Cambridge university press. 1961. 199 p.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. Москва : Наука, 1986. 544 с.
4. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. Москва : Наука, 1969. 872 с.
5. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. Москва : Энергия, 1974. 592 с.
6. Амелин С.В., Дановский Л.М. Путь и путевое хозяйство. Москва : Транспорт, 1986. 215 с.
7. Лазарян В.А. О форме переходной кривой (Теоретические основы выбора рациональной формы переходной кривой). Динамика транспортных средств. Киев : Наукова думка, 1985. С. 10–24.

8. Hooke R., Jeeves T.A. Direct search solution of numerical and statistical problems. *Journal of the ACM*. 1961. Vol. 8. № 2. P. 212–229.
9. Кини Р.П., Райха Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Москва : Радио и связь, 1981. 560 с.

**Borisenko V.D., Ustenko S.A., Ustenko I.V. MODIFICATION OF THE BERNOULLI'S LEMNISCATE AND ITS PRACTICAL APPLICATION**

*The paper is devoted to the development of the method of modification of Bernoulli's lemniscates in order to provide given angles of tangent tangents at the start and end points of the lemniscate's section, located in the region of positive values of the abscissa and ordinates of the Cartesian coordinate system, as well as to draw a curve through an intermediate point. An ordinary lemniscate has a tangent angle of  $45^\circ$  at the origin. At the point of intersection of the petal of the lemniscate with the abscissa axis of Cartesian coordinates, the tangent to it is perpendicular to this axis. To modify lemniscate, two parameters are entered, one of which is the exponent of the root and the other is some rational positive or negative number, but one that does not lead to a negative cosine value under the root sign. Changing the angle of tangent at the starting point is realized by introducing an additional component under the root. The method of drawing a modified lemniscate arc through a point arbitrarily given in the plane of arrangement of the lemniscate with arbitrary angles of tangent at the beginning and end points of the modeled arc of the modified lemniscate is developed. The method is applied to the calculation of the coordinates of the transition curve, which is arranged between the straight and circular sections of the railway track. The problem is solved provided that the modeled curve is tangent to the straight and circular rails, and at a point of joining have a curvature in it equal to the inverse of the radius of the circle of a circular rail. The results of modulation of a test example of a transition curve of the railway track, which confirmed the efficiency of the proposed method of modification of Bernoulli lemniscate. The proposed lemniscate modification method is implemented as a computer code that allows, in addition to numerical results, to obtain graphical representations of simulated curves on a computer monitor screen.*

**Key words:** Bernoulli's lemniscate, modification, tangent, curvature, transition curve.

# ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.924.7

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/02>**Залюбовський М.Г.**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

**Панасюк І.В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Малишев В.В.**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ І ЗМІШУВАННЯ СИПКИХ РЕЧОВИН У РУХОМИХ РОБОЧИХ ЄМКОСТЯХ (ЧАСТИНА 2: ТИПИ ОБЛАДНАННЯ З РУХОМИМИ ЄМКОСТЯМИ)

Виконання галтувальних технологічних операцій обробки дрібних деталей, а також змішування дрібнодисперсних сипких речовин здійснюється з використанням різних типів обладнання з рухомими робочими ємкостями. З урахуванням конструктивних відмінностей і способів виконання відповідних технологічних операцій розроблено класифікацію обладнання з рухомими робочими ємкостями. Установлено, що перспективним типом обладнання є машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. З використанням такого типу обладнання можна досягнути значного скорочення часу, який витрачається на галтувальні технологічні операції та змішування сипких дрібнодисперсних речовин. Описано способи обробки деталей із застосуванням направленої потоку дрібнодисперсного порошкового середовища, що реалізується з використанням дробометних машин, принцип роботи вібраційних, щіткових, роторних машин і машин із планетарним рухом робочих ємкостей. Визначено переваги й недоліки кожного типу обладнання. Показано, що ступінь рухомості просторових механізмів машин зі складним рухом робочих ємкостей, згідно з формулою Сомова-Малишева, дорівнює нулю. Це пов'язано з наявністю надлишкового (пасивного) зв'язку в кінематичному ланцюзі механізму. Наявність надлишкового зв'язку негативно впливає на експлуатаційні властивості машини. Показано найбільш поширені методи звільнення просторових механізмів машин від надлишкового зв'язку.

**Ключові слова:** обробка деталей, змішування сипких речовин, режим руху, холодоагент, робоча ємкість.

**Постановка проблеми.** Натеper відома значна кількість типів обладнання з рухомими робочими ємкостями, котре випускається різними вітчизняними та іноземними виробниками й використовується для реалізації галтувальних технологічних процесів обробки деталей і змішування сипких дрібнодисперсних речовин. Кожен тип обладнання має свою специфіку застосування, свої переваги та недоліки. Для одних типів обладнання, таких як галтувальні машини з обертовими циліндричними ємкостями, що є найбільш поширеними в промисловості, відома достатня кількість досліджень і вдосконалень конструкції. Однак такий тип обладнання залишається найменш ефективним, на обробку деталей може витрачатися до

38 годин безперервної роботи машини. Відома низка інших, більш перспективних типів обладнання: вібраційні машини, комбіновані машини, машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Однак у літературних джерелах досить обмежена кількість інформації щодо специфіки виконання технологічних операцій з використанням відповідних типів обладнання, впливу конструктивних і геометричних параметрів машин на інтенсивність виконання технологічних операцій. Ця тематика потребує систематизації та узагальнення.

**Постановка завдання.** Мета роботи – систематизація літературних даних щодо типів

обладнання з рухомими ємкостями, яке використовується для обробки деталей і змішування сипких дрібнодисперсних речовин.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Усі типи обладнання, яке призначене для обробки деталей і змішування речовин, можна розділити за повними конструктивними особливостями та способами обробки деталей чи змішування сипких речовин. Умовно можна виділити 9 типів обладнання. Отже, авторами розроблено відповідну класифікацію обладнання, яка представлена на рис. 1.

**Машини з обертовими робочими ємкостями** є найпростішим, найпоширенішим та історично найпершим обладнанням у цій галузі обробки деталей. В той само час, такий тип обладнання є найменш ефективним, на обробку деталей може витратитися до 38 годин безперервної роботи машини. Базовою та найпростішою конструкцією обертового барабану є робоча ємкість, яка виконана у формі циліндричного барабану й обертається навколо власної горизонтально розташованої осі [1, с. 3]. Відомі найрізноманітніші технічні рішення щодо вдосконалення цієї конструкції та, як наслідок, спроб інтенсифікації процесів галтування. Використовуються робочі ємкості з гранованим профілем [2, с. 120], циліндричні барабани зі зміщеною віссю обертання (типу «п'яної бочки») [2, с. 121], ємкості з нахилоною віссю обертання, а також ємкості з V-подібною формою, у котрих дві циліндричні камери з'єднані між собою під кутом  $30^\circ$ – $75^\circ$ , запропонована конструкція обертової робочої ємкості [3, с. 2], яка оснащена діафрагмою, що має гвинтову геометричну форму. Відоме технічне рішення [4, с. 3], де робоча гранована ємкість складається з декількох концентричних співвисно розміщених складників конусоподібної чи іншої форми, які можуть

бути встановлені на одній осі та мають можливість обертання в зустрічних напрямках, прилягаючи одне до одного із зазорами, меншими за розмір наповнювача й деталей, що обробляються.

Однак, незважаючи на всі вдосконалення конструкції, значного збільшення продуктивності під час обробки деталей чи змішування сипких речовин так і не вдалося досягти. Саме тому застосовуються принципово інші конструкції машин.

**Шпиндельні машини** за своєю конструкцією схожі на роторні машини. У таких машинах шпиндель разом із закріпленими на ньому деталями обертається в робочій ємкості, заповненій абразивним матеріалом. Заявлена конструкція машини [5, с. 2–4], де робоча ємкість також отримує обертальний рух у напрямку, який зворотний до напрямку обертання шпинделя.

**Вібраційні машини.** Сутність роботи вібраційних машин [6, с. 5–50] полягає в послідовному нанесенні великої кількості мікроударів по поверхні оброблюваної деталі. Мікроудари наносяться в результаті зіткнень деталей одна з одною, зі стінками контейнеру, а також з твердими частинками наповнювача під час переміщення технологічного середовища в контейнері пристрою під впливом вібраційних сил. Із застосуванням вібраційних машин виникає можливість обробки деталей із габаритними розмірами до 0,3–0,5 м. Однак сфера використання вібраційних машин доволі вузька, у зв'язку з тим що величина припуску, яку можна зняти з поверхні деталі за допомогою них, не перевищує 0,025 мм [7, с. 133]. До того ж відомий факт негативного впливу вібрацій на конструкцію самої машини, які здатні викликати виникнення додаткових зусиль, так званий динамічний тиск. Станина механізму також отримує динамічний тиск, що передається на зв'язаний із нею фундамент, здійснюючи шкідливу дію на



Рис. 1. Класифікація обладнання, яке призначене для об'ємної обробки деталей і змішування речовин



його кріплення та порушуючи тим самим зв'язок між станиною та фундаментом. Заявлена в патенті [8, с. 2–3] вібраційна машина з конструкцією, що складається з U-подібного підпружиненого контейнеру, віброзбудника з декількома дебалансами, вал якого через компенсуючу муфту з'єднаний із ротором електродвигуна та пружини, на які встановлений U-подібний контейнер.

Розроблені конструкції, що поєднують властивості декількох типів машин: шпиндельна вібраційна машина [9, с. 3], у якій оброблювані деталі закріплюють на кінці шпинделя, що занурюється в робочу ємкість з абразивним матеріалом, шпинделю надається обертальний чи коливальний рух, абразивному матеріалу – вібраційний рух. Також застосовують складні конструкції вібраційних машин [10, с. 92–140] для змішування сипких продуктів.

**Планетарні машини.** Доведено [11, с. 145–155], що значного підвищення ефективності обробки деталей можна досягнути за рахунок використання планетарних і відцентрових машин. Процес обробки здійснюється під час переміщення частинок маси робочого масиву (наповнювач та оброблювані деталі) по поверхні деталі при певному контактному тиску. Реалізація процесу в планетарних ємкостях дає змогу ефективно використовувати відцентрові сили інерції для досягнення значень зазначених параметрів, що забезпечують інтенсивне протікання процесу обробки. У загальному випадку в планетарно-відцентровій установці встановлено водило, на якому розташовані ємкості з можливістю обертання навколо своїх осей. Водило приводиться в обертання, і робочий масив під дією відцентрових сил інерції переміщається в периферійну частину ємкості завдяки обертанню ємкості навколо власної осі.

**Комбіновані конструкції,** що є поєднанням різних типів конструкцій пристроїв. Наприклад, вібропланетарна машина [12, с. 2], у якій ємкість із робочим масивом установлена з можливістю обертання навколо власної осі, центральної осі водила, крім того, ємкість отримує вібраційний рух. Пристрої для вібраційної шпиндельно-планетарної обробки деталей [13, с. 2–3], у яких оброблювані деталі закріплені на шпинделях, що виконують планетарний рух у робочих ємкостях, котрим надано вібраційного руху.

**Машини роторного типу** [14, с. 2–3] головним чином призначені для змішування сипких речовин у робочій ємкості за рахунок обертання в них одного, двох або декількох роторів, котрі можуть бути різних конструкцій.

**Щіткові машини** призначені для видалення з оброблюваних деталей облою та ливників за допомогою спеціальних обертових щіток. Щіткові машини можуть бути двох типів: з рухомою робочою ємкістю й зі стаціонарною (нерухомою) робочою ємкістю.

Великогабаритні деталі піддаються обробці методом впливу на них кінетичної енергії від направленного потоку сипкого дрібнодисперсного порошкового середовища, що реалізується з використанням **дробометних машин** [15, с. 127–137]. Як середовище може застосовуватися порошковий наповнювач або ж потік скрапленого газу чи рідини із цим наповнювачем. У результаті такої обробки з поверхонь, які піддаються впливу цього направленного потоку, видаляються продукти корозії, лакофарбове покриття тощо.

**Машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей** [16, с. 250–260]. У таких машинах робоча ємкість не обмежується переміщенням в одній площині, а виконує складний просторовий рух водночас стосовно трьох взаємно перпендикулярних осей координат з додатковим обертанням ємкості навколо власної вісі обертання. Відома розробка швейцарської компанії Віллі А Бахофен (ВАН) Turbula [17, с. 145], що являє собою машину зі складним рухом робочої ємкості. Характер складного руху робочого масиву в ємкості такої машини подібний до турбулентного режиму руху рідини чи газу.

Відоме [18, с. 150–244; 19, с. 543–545] успішне використання такої машини для процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин. Дослідження [20, с. 220–235] показали, що за рекордно короткий проміжок часу з використанням машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей можна досягнути повної сегрегації двох дрібнодисперсних сипких речовин. Установлено [18, с. 193–196], що повна сегрегація настає приблизно після 10–20 обертів ведучого валу машини.

Авторами також успішно проведені дослідження щодо можливості використання цієї конструкції машини для реалізації гальтувальних технологічних операцій обробки дрібних деталей, зокрема для виконання технологічної операції відділення металевих деталей від ливників [21, с. 10–15] і полірування поверхні дрібних полімерних деталей [22, с. 25–29]. Проведені дослідження показали, що з використанням цього типу обладнання час виконання технологічної операції відділення металевих деталей від ливників зменшено в середньому в 10 разів (залежно від типу оброблюваних деталей), а час виконання технологічної

операції полірування поверхні полімерних деталей зменшено приблизно в 1,5–2 рази. Отже, підтверджено актуальність використання такого обладнання не лише для процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин, а й для галтувальних процесів обробки дрібних металевих і полімерних деталей.

Однак, незважаючи на явні переваги обладнання зі складним просторовим рухом робочих ємкостей, «базова» конструкція самого просторового механізму машини має суттєвий недолік – це наявність у кінематичному ланцюзі просторового механізму надлишкового зв'язку, який негативно впливає на довговічність та експлуатаційні характеристики механізму. Ступінь рухомості таких просторових механізмів машини, згідно з формулою Сомова-Малишева [17, с. 10], дорівнює нулю. Установлено [23, с. 402], що механізм може функціонувати лише за дотримання чітких конструктивних співвідношень довжин його ланок. Під час роботи механізму навіть при незначній деформації однієї з ланок може виникнути його заклинювання, як наслідок, він одразу виходить із ладу. Крім того, деталі потрібно виготовляти за допусками з підвищеною точністю. За рахунок цього собівартість такого обладнання значно підвищується, а термін експлуатації знижується.

Однак відомі роботи щодо вдосконалення конструкцій машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості на основі виключення з кінематич-

ного ланцюга просторового механізму надлишкового зв'язку. У патентах заявлені різноманітні конструкції вдосконалених машин. Так, у роботі [24, с. 2–3] розроблено машину з додатковою рухомою ланкою – коромислом, вісь обертання якого знаходиться у вертикальній площині; авторами розроблені конструкції з двома рухомими робочими ємкостями, що можуть бути з'єднані між собою поступальною [25, с. 2–4] чи обертальною [26, с. 2–4] кінематичною парою; у праці [27, с. 1–3] представлено конструкцію машини із застосуванням у кінематичному ланцюзі механізму вищої кінематичної пари 4-го класу. Отже, у всіх розроблених конструкціях відсутня наявність надлишкового (пасивного) зв'язку.

**Висновки.** Систематизовано літературні дані щодо типів обладнання з рухомими ємкостями, яке використовується для обробки деталей і змішування сипких дрібнодисперсних речовин.

Розроблено класифікацію обладнання, яке призначене для обробки деталей і змішування речовин за конструктивними особливостями та способами технологічних операцій.

На основі аналізу літературних даних установлено, що перспективним типом обладнання є машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей. З використанням такого типу обладнання можна досягнути значного скорочення часу, який витрачається на галтувальні технологічні операції та змішування сипких дрібнодисперсних речовин.

#### Список літератури:

1. Авторское свидетельство СССР № 837800, кл. В 24 В 31/02, 1979.
2. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении. Санкт-Петербург : Политехника, 2007. 425 с.
3. Пат. України 6219, МПК В 24 В 31/02. Устрій для галтовки виробів / Ю.О. Турік, заявник та патентовласник Ю.О. Турік. № 2950551/25-08; заяв. 02.07.1980, опуб. 29.12.1994, бюл. № 8-І/1994.
4. Пат. України 38253, МПК В24В 31/033. Спосіб об'ємної обробки поверхні деталі / О.І. Буря, С.С. Фасатуров, А.С. Кобець, О.Д. Деркач, заявник та патентовласник Дніпропетровський державний аграрний університет. № 2000063429; заяв. 12.06.2000, опуб. 15.05.2001, бюл. № 4/2001.
5. Пат. України 6219, МПК В 24 В 31/02. Устрій для галтовки виробів / Ю.О. Турік, заявник та патентовласник Ю.О. Турік. № 2950551/25-08; заяв. 02.07.1980, опуб. 29.12.1994, бюл. № 8-І/1994.
6. Шумакова Т.А., Шаповалов В.И., Гутько Ю.И. Инструмент для виброабразивной обработки деталей : монография / Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля. Луганск : Ноулидж, 2011. 59 с.
7. Шварц А.И. Механизация и автоматизация производства формовых РТИ : учебное пособие для рабочего образования. Москва : Химия, 1987. 176 с.
8. Пат. України 38804, МПК В24В 31/067. Вібраційна машина / А.В. Силивонюк, П.П. Нахасєв, В.М. Тимошук, заявник та патентовласник Луцький державний технічний університет. № u200805362; заяв. 24.04.2008, опуб. 26.01.2009, бюл. № 2/2009.
9. Пат. України 8831, МПК В24В 31/06. Спосіб вібраційної обробки деталей / О.О. Оніщенко, Г.Г. Баскаков, В.М. Саповець, заявник та патентовласник Науково-виробниче об'єднання «Хімтекстильмаш». № 4135344/SU; заяв. 17.10.1986, опуб. 30.09.1996, бюл. № 3/1996.
10. Шушпанков А.Б., Иванец Г.Е. Смесительные агрегаты вибрационного типа для дисперсных материалов. Кемерово : Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2008. 152 с.
11. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій



та шкіргалантереїної промисловості: монографія / під заг. ред. В.П. Коновала. Хмельницький : ХНУ, 2007. 255 с.

12. Пат. України 32665, МПК В24В 31/06. Машина для вібропланетарної обробки / П.С. Берник, І.П. Паламарчук, І.Г. Липовий, заявник та патентовласник Вінницький державний сільськогосподарський інститут. № u200800346; заяв. 10.01.2008, опуб. 26.05.2008, бюл. № 10/2008.

13. Пат. України 72282, МПК В24В 31/06. Пристрій для вібраційної шпіндельно-планетарної обробки деталей / П.С. Берник, В.Г. Писаренко, Л.В. Ярошенко, Є.Ф. Боковий, В.М. Пазюк, заявник та патентовласник Л.В. Ярошенко. № 2002054019; заяв. 16.05.2002, опуб. 15.02.2005, бюл. № 2/2005.

14. Пат. України 34562, МПК В29В 7/00. Роторний змішувач / І.О. Мікульонок, В.Т. Вознюк, заявник та патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». № u200804640; заяв. 10.04.2008, опуб. 11.08.2008, бюл. № 15/2008.

15. Копин В.А., Макаров В.Л., Ростовцев А.М. Обработка изделий из пластмасс. Москва : Химия, 1988. 176 с.

16. Mayer-Laigle C., Gatumel C., Berthiaux H. Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. March 2015. Volume 95. P. 248–261.

17. Решетов Л.Н. Конструирование рациональных механизмов. 2-е изд., переработ. и доп. Москва : Машиностроение, 1972. 256 с.

18. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD. The University of Birmingham, UK., 2012. P. 311.

19. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Ingram A., Stitt E.H. A numerical comparison of mixing efficiencies of solids in a cylindrical vessel subject to a range of motions, *Powder Technology*, Powder Technology 217 (2012). P. 540–547;

20. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Cook M., Ingram A., Stitt E.H. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of TurbulaMixer Motion using Positron Emission Particle Tracking, *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2010. Vol. 59. № 3 (2010). P. 217–238.

21. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Аналітичне визначення часу виконання технологічної операції відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 6 (140). С. 9–18.

22. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity / M.G. Zalyubovskiy, I.V. Panasyuk, Y.I. Smirnov, Y.V. Klapstov, V.V. Malyshev. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. Vol. 2. P. 24–32.

23. Хростицкий А.А., Терёшин В.А. Особенности структуры и геометрии пространственного шестизвенного механизма с избыточными связями. *Современное машиностроение. Наука и образование* : материалы Междунар. науч.-прак. конф. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 399–409. URL: [www.mmf.spbstu.ru/konf\\_2011/55.pdf](http://www.mmf.spbstu.ru/konf_2011/55.pdf).

24. Патент Российской Федерации № 2077941, МПК 15 В01F11/00. Смеситель для сыпучих и жидких веществ / Т.А. Грузнова, Г.В. Малахова, Н.А. Фридкина, заявитель и патентообладатель Акционерное общество открытого типа НИКТИ «Электроприбор». № 94045445/26; заяв. 27.12.1994, опуб. 27.04.1997, бюл. № 13

25. Патент № 126647, МПК В01F 11/00 (2018.01). Машина для обробки деталей / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну. № u201801469; заяв. 15.02.2018, опуб. 25.06.2018, бюл. № 12.

26. Патент № 127438, МПК В24В 31/00 (2018.01). Машина для обробки деталей / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну. № u201803397; заяв. 30.03.2018, опуб. 25.07.20.

27. Патент №127611, МПК В24В 37/00 (2018.01), В24В 37/07 (2012.01). Машина для обробки деталей / М.Г. Залюбовський, І.В. Панасюк, заявник та патентовласник Київський національний університет технологій та дизайну. № u201802817; заяв. 20.03.2018, опуб. 10.08.2018, бюл. № 15; 18, бюл. № 14.

## **Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Malyshev V.V. PERSPECTIVE TECHNOLOGIES FOR PART PROCESSING AND MIXING OF BULK MATTERS INTO MOBILE WORKING TANKS (PART 2: TYPES OF EQUIPMENT WITH CAPACITIES MOVEMENT)**

*Tumbling technological operations of processing small parts, as well as mixing finely divided bulk solids, are carried out using various types of equipment with moving working capacities. Given the design differences and methods for performing the corresponding technological operations, a classification of equipment with moving working capacities has been developed. It has been established that machines with heavy spatial movement of working capacities are a promising type of equipment. Using this type of equipment, it is*

*possible to achieve a significant reduction in the time spent on tumbling technological operations and mixing bulk solids. While machines with rotating working capacities are the least efficient type of equipment, up to 38 hours of continuous operation of the machine can be spent on processing parts in them. The described methods for processing parts using a directed flow of finely divided powder media are implemented using shot blasting machines, the principle of operation of vibrating, brush, machines and machines with planetary movement of working capacities is described. The advantages and disadvantages of each type of equipment are determined. It is shown that the degree of mobility of the spatial mechanisms of machines with a complex movement of working capacities, according to the Somov-Malyshev formula, is zero. This is due to the presence of excess (passive) communication in the kinematic chain of the mechanism. The presence of excess communication negatively affects the operational properties of the machine. This design of the machine can only function while ensuring high accuracy of the lengths of the links of the spatial mechanism, and even with a slight deformation of one of the links, jamming of the mechanism may occur, as a result, the machine immediately fails. The most common methods for freeing the spatial mechanisms of machines from excessive communication are shown.*

**Key words:** *processing of parts, mixing of bulk solids, mode of movement, refrigerant, working capacity.*

УДК 621.923.42  
DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/03>

**Кальченко В.І.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Кальченко В.В.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Венжега В.І.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Винник В.О.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Скляр В.М.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Кальченко Д.В.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ КУЛАЧКІВ РОЗПОДІЛЬЧОГО ВАЛА ПЕРИФЕРІЄЮ ОРІЄТОВАНОГО ІНСТРУМЕНТА НА МОДЕРНІЗОВАНОМУ ВЕРСТАТІ В3208Ф4

*Стаття присвячена розробленню та дослідженню нового способу високошвидкісного фрезерування кулачків розподільних валів зі схрещеними осями інструмента й деталі на модернізованому для цього універсально-заточувальному верстаті з ЧПК моделі В3208Ф4, що забезпечить підвищення точності оброблених поверхонь і продуктивності обробки.*

*Технологія високошвидкісного фрезерування є однією з найбільш сучасних та ефективних альтернатив класичним методам обробки, що значно відрізняється якістю і швидкістю обробки, а також можливістю виготовлення виробів із важкооброблюваних матеріалів. Високошвидкісне фрезерування – сучасний високотехнологічний метод обробки, що дає змогу отримувати найменші перетини зрізу металу під час використання високих швидкостей знімання. Сутність цієї технології полягає у використанні певного діапазону швидкостей різучого інструменту, що призводить до істотного зниження опору матеріалу під час його обробки, чим забезпечується обробка важкооброблюваних матеріалів. Особливістю цієї технології є те, що тепло, яке виділяється під час обробки, практично повністю зосереджено в стружці й не перебуває тривалий час у зоні обробки, через що фреза й деталь мало схильні до термічного впливу. Швидкісне фрезерування переважно реалізується за допомогою багатокоординатних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), проте стійкий процес різання неможливо забезпечити на наявному обладнанні без модернізації системи ЧПК, приводу головного руху, який би забезпечував необхідну швидкість різання й використання спеціального інструменту.*

*Запропонована методика фрезерування криволінійних поверхонь на верстатах із ЧПК може бути застосована для процесів фрезерування різноманітних циліндричних поверхонь складного профілю зі схрещеними осями інструмента й деталі.*

**Ключові слова:** високошвидкісне фрезерування, точність обробки, продуктивність обробки, модульне тривимірне геометричне моделювання, орієнтований інструмент, формоутворення, розподільний вал, кулачок.

**Постановка проблеми.** Під час робіт на великих робочих подачах і високій швидкості різання, якими характеризується високошвидкісне фрезерування, необхідно забезпечити стійкий процес різання, що неможливо на наявному стандартному обладнанні без його модернізації. Для реалізації

методу високошвидкісної обробки на універсально-заточувальному верстаті з ЧПК моделі В3208Ф3, що має базову систему ЧПК 2С42, яка морально та фізично застаріла, потрібно провести її заміну, дослідити можливості верстату, удосконалити деякі наявні вузли та підібрати інструмент.

Високошвидкісне фрезерування є продуктивним способом обробки зовнішніх циліндричних поверхонь. Дослідження, удосконалення й упровадження нових способів фрезерної обробки сприятиме забезпеченню більш високої точності та якості оброблених поверхонь за високої продуктивності фрезерування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] проаналізовано перспективні напрями підвищення продуктивності обробки різанням, з'ясовано, що головний ефект високошвидкісної обробки полягає в підвищенні якості обробки й можливості ефективного використання сучасних верстатів з ЧПК. Підвищення швидкості різання за рахунок використання більш ефективного ЗОТС пов'язано зі зменшенням сил різання під час точіння та розточування. Це, у свою чергу, призводить до зменшення пружних відтискань у технологічній системі при фіксованій її жорсткості. Тобто перетворення ресурсу стійкості ріжучого інструменту в ресурс збільшення швидкості різання водночас призводить до збільшення точності обробки за виконанням розміром.

У роботі [2] запропоновано спосіб обробки поверхонь обертання великого діаметра (наприклад, валків прокатних станів) двома торцевими фрезами, осі яких схрещуються з віссю оброблюваної заготовки. Обробка при цьому здійснюється з поздовжньою подачею фрези вздовж осі заготовки. Однак у наведених дослідженнях висвітлено питання обробки лише відносно довгих поверхонь із поздовжньою подачею інструменту та коротких у разі її відсутності. У роботі А.О. Етін [3] для окремих випадків наведено залежності, за якими можна визначити похибки обробки в поздовжньому й поперечному перерізах заготовки при фрезеруванні циліндричних

деталей. Також дослідження процесів фрезерування тіл обертання описані в праці [4]. У роботах [5; 6] проведено дослідження фрезерування деталей типу тіл обертання набором дискових фрез (спосіб Rotomille). Перевагою такого способу є можливість отримати поверхню деталі за один установ. Однак цей спосіб не отримав широкого застосування. Істотними недоліками є складність виготовлення й експлуатації інструменту, а також те, що забезпечення високої жорсткості системи супроводжується зменшенням кругових подач, що призводить до зменшення продуктивності обробки.

У роботі [7] наведено геометричний аналіз похибок формоутворення при фрезеруванні поверхонь обертання торцевою фрезою.

Відома фірма Junker (Німеччина) [8; 9] виконує обробку розподільних валів вузьким шліфувальним кругом 1, висота якого менша за довжину опорних шийок (рис. 1).

Під час обробки кулачків інструмент здійснює зворотно-поступальний рух у площині, яка проходить через вісь обертання інструмента 1 і деталі 2. Подача по контуру та глибина різання при цьому змінюються за координатою обробки, що зменшує продуктивність обробки й точність обробленої поверхні.

**Постановка завдання.** Мета статті – розробити й дослідити новий спосіб високошвидкісного фрезерування кулачків розподільних валів зі схрещеними осями інструмента й деталі на модернізованому для цього універсально-заточувальному верстаті з ЧПК моделі В3208Ф4, що забезпечить підвищення точності оброблених поверхонь і продуктивності обробки.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Універсально-заточувальний напівавтомат з ЧПК

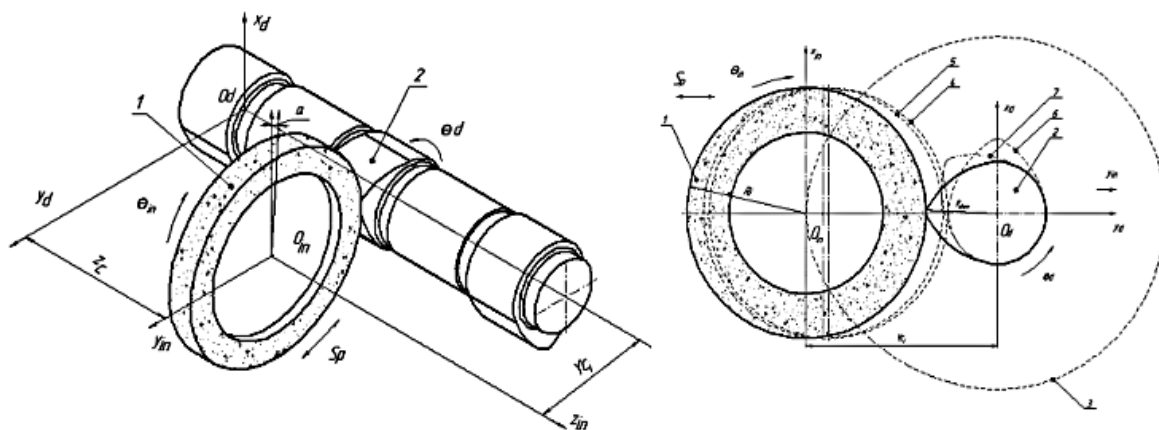


Рис. 1. Схема шліфування кулачка розподільчого вала фірмою Junker



моделі В3208Ф3 у базовій комплектації призначений для заточування й доведення циліндричних інструментів по передніх і задніх поверхнях, розташованих на периферії й торцю, шліфувальними кругами в умовах дрібносерійного й одиничного виробництва.

Він складається з таких основних частин: станини, столу; каретки з колоною, механізмів поперечної, поздовжньої та вертикальної подачі; шліфувальної бабки та бабки виробу. Керування забезпечується системою ЧПК 2С42, по чотирьох координатах (за трьома водночас). Конструкція верстата забезпечує такі переміщення робочих органів:

- обертання шліфувального круга;
- вертикальне переміщення шліфувальної головки;
- поперечне переміщення шліфувальної головки;
- поздовжнє переміщення столу;
- обертання виробу.

У роботі [10] проведено дослідження точнісних і жорсткісних характеристик універсально-заточувального верстату моделі В3208Ф3 з базовою системою ЧПК 2С42 з метою використання його для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання. Обґрунтовано та запропоновано низку рішень з переобладнання системи ЧПК сучасною від персонального комп'ютера, окремих вузлів приводу головного руху, використання як інструменту дискових фрез, оснащених різальними пластинами з кубічного нітриду бору.

Установлено, що найбільша техніко-економічна ефективність застосування інструменту з НТМ досягається під час його експлуатації в оптимальних умовах, які характеризуються високими швидкістю різання, жорсткістю й вібростійкою

верстата і системи верстат-приспосовування-інструмент-заготовка, стабільністю розмірів і фізико-механічних характеристик заготовок. Вимога високих жорсткості й вібростійкості обладнання та всієї системи верстат-приспосовування-інструмент-деталь зумовлено не тільки тим, що інструмент з НТМ застосовують, як правило, для виготовлення деталей з високою точністю й низькою шорсткістю, а й дуже істотною залежністю стійкості ріжучого інструменту з НТМ від згаданих характеристик верстата. Велике значення мають жорсткість верстата, рівномірність обертання шпинделя й руху подачі, а також кінематична точність обертання шпинделя. Важливим фактором є не тільки жорсткість самого шпинделя та механізму його кріплення, а й загальна жорсткість верстата. Експериментальні дослідження показали, що при торцевому фрезеруванні жорсткість приводу верстата впливає на опір викришування різальних крайок, тоді як загальна жорсткість верстата впливає на знос ріжучих інструментів.

Схема процесу фрезерування розподільного вала 2, повернутим на кут  $\beta$  інструментом 1, представлена на рис. 2а.

На рис. 2б зображено переріз А-А, при чистовій обробці зрізання всього припуску  $t$  відбувається периферією фрези, вісь повороту фрези знаходиться в точці А для забезпечення роботи всієї периферії фрези.

При обертанні розподільного вала 1 на кут  $\theta_{det}$  (рис. 3а, 3б) точка контакту 3 фрези 2 з кулачком розподільного вала 1 переміщується за рахунок синхронних вертикального й поперечного рухів інструмента  $S_{inst}$ , вона завжди перебуває в горизонтальній площині, яка проходить через вісь обертання фрези та центр кривизни деталі, це

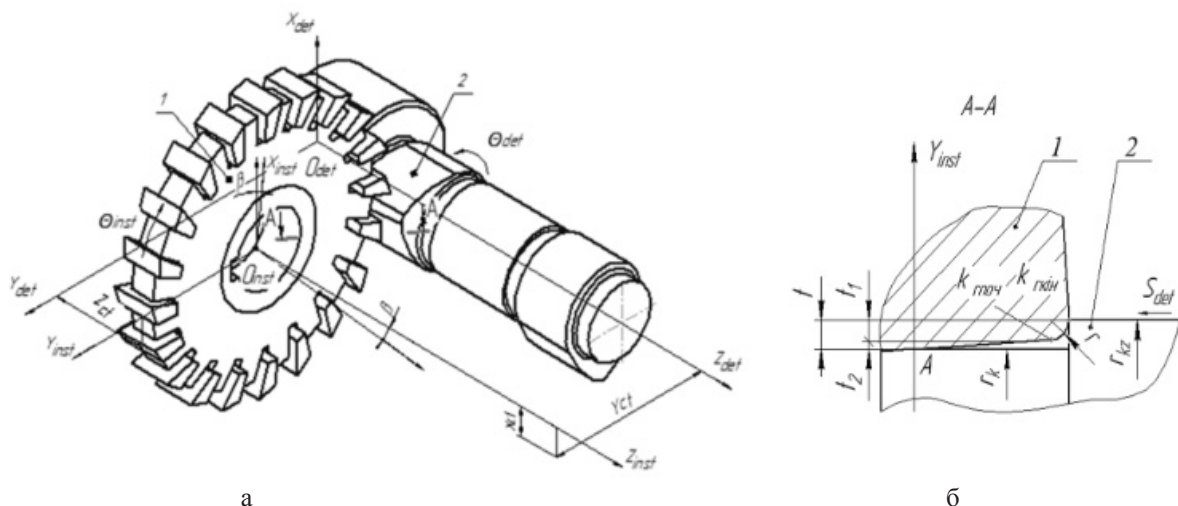


Рис. 2. Фрезерування розподільного вала зі схрещеними осями інструмента й деталі

забезпечує постійну глибину різання й подачу по контуру [11; 12].

Нерівномірне обертання розподільного вала при фрезеруванні кулачка стабілізує зняття припуску та подачу по контуру (рис. 4б) порівняно з методом обробки з рівномірним обертанням (рис. 4а).

Це дасть змогу при фрезеруванні поверхонь на верстатах з ЧПК враховувати тільки форму деталі, виключаючи вплив радіуса інструмента і його знос на точність формоутворення, завдяки чому підвищується продуктивність і якість обробки.

Модульну 3D-модель поверхні фрези описуємо циліндричним інструментальним модулем:

$$\bar{r}_{lf} = MC^I_{Z_{lf}(k) \cdot \Theta_{lf} \cdot R_{lf}(k)} \cdot \bar{e}_4, \quad (1)$$

де  $\bar{r}_{lf}$  – радіус-вектор інструментальної поверхні фрези;  $MC^I_{Z_{lf}(k) \cdot \Theta_{lf} \cdot R_{lf}(k)}$  – циліндричний інструментальний модуль формоутворення фрези;  $\bar{e}_4$  – радіус-вектор початку координат [13];  $Z_{lf}(k)$  –  $k$ -та осьова координата інструментальної поверхні фрези,  $\Theta_{lf}$  – кут повороту інструмента

навколо осі  $O_{inst}Z_{inst}$ ,  $R_{lf}(k)$  –  $k$ -тий радіус інструментальної поверхні фрези.

Інструментальний циліндричний модуль формоутворення фрези описується добутком однокоординатних матриць:

$$MC^I_{Z_{lf}(k) \cdot \Theta_{lf} \cdot R_{lf}(k)} = M^3(Z_{lf}(k)) \cdot M^6(\Theta_{lf}) \cdot M^2(R_{lf}(k)), \quad (2)$$

де  $M^1, M^2, M^3, M^4, M^5, M^6$  – однокоординатні матриці, що описують переміщення вздовж осей  $X_{inst}, Y_{inst}, Z_{inst}$  та повороти навколо них  $O_{inst}X_{inst}, O_{inst}Y_{inst}, O_{inst}Z_{inst}$  відповідно [14].

Номинальна поверхня оброблюваної деталі описується добутком радіус-вектора інструментальної поверхні фрези, модуля орієнтації та модуля формоутворення:

$$\bar{r}_{df} = MC^F_{Z_{ct}(\Theta_{df}) \cdot \Theta_{df} \cdot Y_{ct}(\Theta_{df})} \cdot MS^O_{\beta \cdot X_{ct}} \cdot \bar{r}_{lf}, \quad (3)$$

де  $\beta$  – кут нахилу фрези відносно вісі  $O_{inst}Y_{inst}$ ;  $X_{ct}, Y_{ct}$  – міжосьова відстань фрези й деталі в вертикальній і горизонтальній площині відповідно;

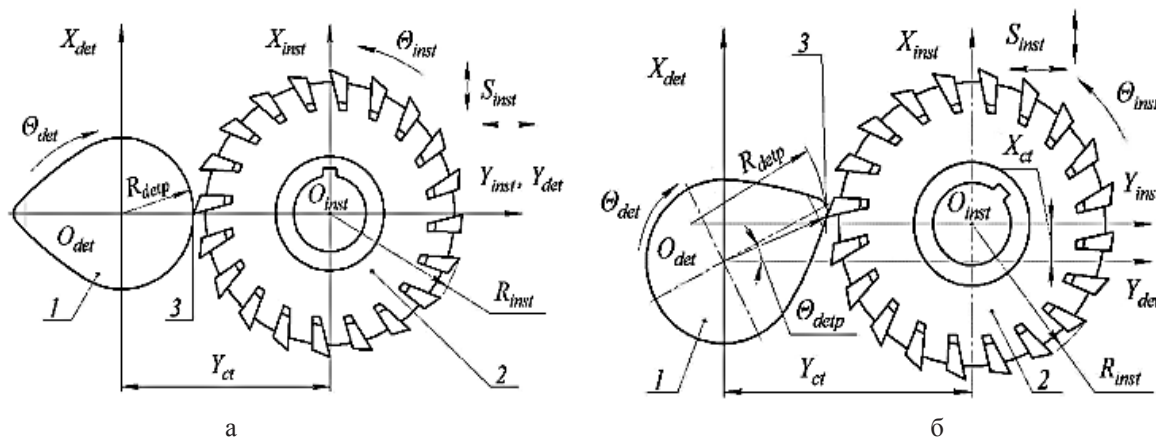


Рис. 3. Схема обробки кулачка

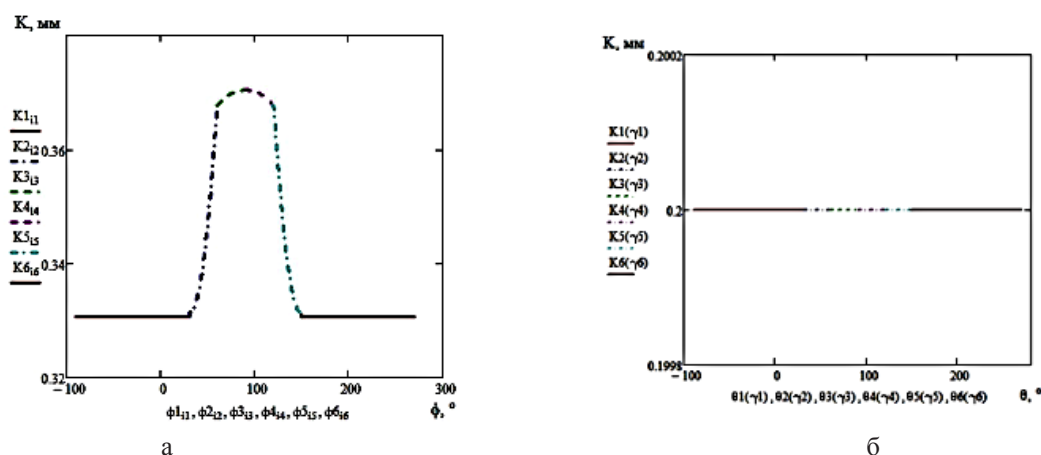
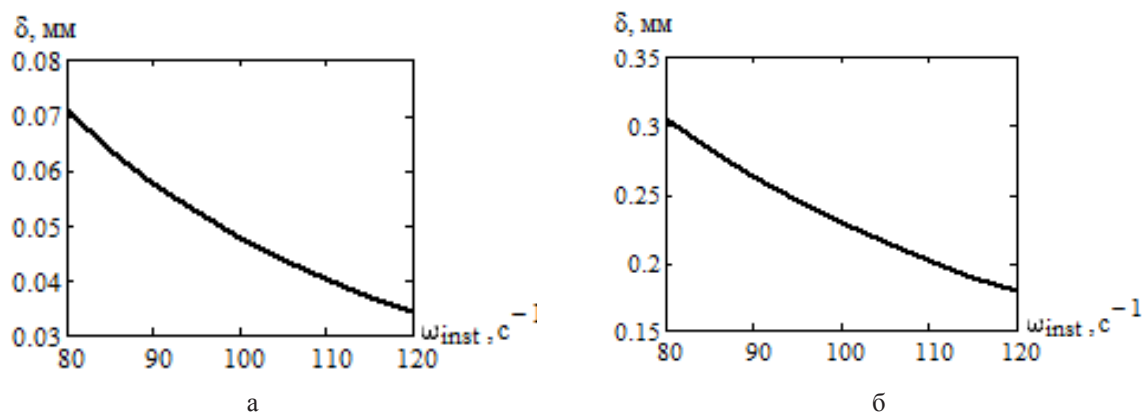
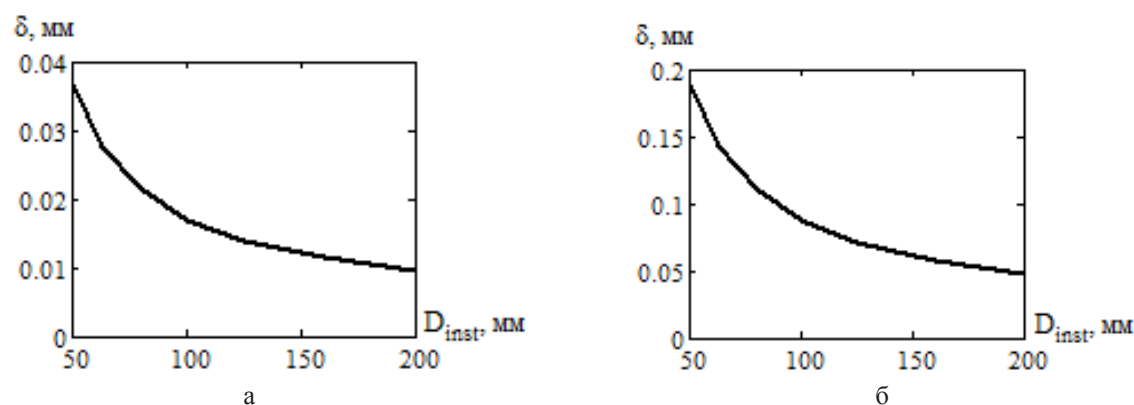


Рис. 4. Подача по контуру

Рис. 5. Залежність відхилення від круглості  $\delta$  кулачка від частоти обертання  $\omega_{inst}$ Рис. 6. Залежність відхилення від круглості  $\delta$  кулачка від частоти обертання  $\omega_{inst}$ 

$\Theta_{Df}$  – кут повороту деталі;  $Z_{ct}$  – подача, яка описує рух деталі вздовж осі  $O_{det}Z_{det}$  стосовно фрези.

Під час обробки кулачка координати  $X_{ct}$ ,  $Y_{ct}$  змінюються й залежать від кутової координати повороту кулачка, під час обробки ділянки кулачка, центр якої співпадає з віссю розподільного вала  $X_{ct}$ , дорівнює нулю, а  $Y_{ct}$  не змінюється.

Отримані графіки залежності величини відхилення від круглості  $\delta$  при фрезеруванні ділянки кулачка, центр якої співпадає із центром кулачка (рис. 5а; 6а), та при обробці ділянки кулачка найбільшого радіуса (рис. 5б; 6б) – від частоти обертання інструменту  $\omega_{inst}$  (рис. 5а, 5б), діаметра фрези  $D_{inst}$  (рис. 6а, 6б).

Аналіз графіків рис. 6 показує, що при високошвидкісному фрезеруванні збільшення частоти обертання інструменту призводить до значного зменшення відхилення від округлості обробленої поверхні.

**Висновки.** Розроблено новий спосіб високошвидкісного фрезерування кулачків на модернізованому універсально-заточувальному верстаті з ЧПК від персонального комп'ютера моделі В3208Ф4 периферією орієнтованого інструменту з різальними елементами з надтвердих матеріалів, що дає змогу знизити теплонапруженість процесу, так як тепло, що виділяється під час обробки, практично повністю зосереджено в стружці й не перебуває тривалий час у зоні обробки, через що фреза й деталь мало схильні до термічного впливу. Оброблені так поверхні деталей мають значно менші відхилення від округлості, що наближує цей процес до шліфування. Запропонований спосіб може бути застосований для фрезерування розподільчих валів двигунів внутрішнього з'єднання, валів коробок перемикачів швидкостей автомобілів і тракторів, що підвищує продуктивність і точність обробки, їх надійність і ресурс.

#### Список літератури:

1. Левченко Я.К., Маршуба В.П. Умови ефективного застосування високошвидкісної обробки. *Машинобудування*. 2012. № 9. С. 52–60.
2. Полетаев В.А., Волков Д.И. Особенности стружкообразования при фрезеровании и фрезоточении тел вращения. *Инженерный журнал*. 2001. № 7. С. 18–21.



3. Этин А.О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. Москва : Машиностроение, 1964. 324 с.
4. Полетаев В. А. Конструктивные особенности приводов подач станков для кругового фрезерования. *Инженерный журнал*. 2001. № 8. С. 63–64.
5. Технология механической обработки артиллерийских снарядов. Москва : Оборонгиз, 1948. 658 с.
6. Грязев М.В., Степаненко А.В. Перспективные технологии обработки поверхностей вращения фрезерованием. *Известия ТулГУ. Серия «Технические науки»*. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 130–136.
7. Грязев М.В., Степаненко А.В. Фрезерование наружных цилиндрических поверхностей торцовой фрезой. *Известия ТулГУ. Серия «Технические науки»*. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 140–148.
8. Шлифование распределительных валов кругами из кубического нитрида бора. Проспект фирмы «Junker maschinen» на станки «JUCAM 1000», «JUCAM 3000», «JUCAM 5000», «JUCAM 6000». Erwin Junker. Maschinen fabric GmbH, Junkerstraße 2. 77787 Nordrach. Germany, 2006. 8 с.
9. CBN crankshaft grinding. Prospect firm «Junker maschinen» on machines «JUCRANK 1000», «JUCRANK 3000», «JUCRANK 5000», «JUCRANK 6S/L/XL». Erwin Junker. Maschinen fabric GmbH, Junkerstraße 2. 77787 Nordrach. Germany, 2012. 12 p.
10. Модернізація універсально-заточувального верстата з ЧПК ВЗ 208 ФЗ для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, В.І. Венжега, В.О. Винник. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 9–17.
11. Кальченко В.І., Кальченко Д.В., Следнікова О.С. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями розподільного вала і круга. *Резание и инструмент в технологических системах*. Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. Вып. 85. С. 98–106.
12. Модульне 3D моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при фрезеруванні кулачків зі схрещеними осями інструменту і деталі / О.С. Следнікова, В.О. Винник, В.М. Скляр, О.О. Аксьонова. *Технічні науки та технології*.
13. Грабченко А.И., Кальченко В.И., Кальченко В.В. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : монография. Чернигов : ЧДТУ, 2009. 256 с.
14. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. Москва : Машиностроение, 1996. 336 с.

**Kalchenko V.I., Kalchenko V.V., Wenzhega V.I., Vinnik V.A., Sklar V.M., Morochko V.V. RESEARCH PROCESS OF SPEED MILLING OF CAMSHAFT ROLLS IN THE PERIPHERY OF THE ORIENTED TOOL ON THE MODERNIZED MACHINE WZ208F3**

*The article is devoted to the development and research of a new method of high-speed milling of camshafts camshafts with crossed axes of a tool and details on the modernized for this purpose the universal-sharpening machine of the CNC model VZ208F4, which will improve the accuracy of machined surfaces and productivity.*

*High-speed milling technology is one of the most up-to-date and effective alternatives to classic machining methods, which is significantly different in quality and speed of machining, as well as the ability to manufacture products from difficult-to-process materials. High-speed milling is a state-of-the-art, high-tech machining method that allows you to obtain the smallest cross-sections of metal when using high speeds of removal. The essence of this technology is to use a certain range of speeds of the cutting tool, which leads to a significant reduction in the resistance of the material during its processing, which ensures the processing of difficult materials. A feature of this technology is that the heat released during processing is almost completely concentrated in the chip and does not stay for a long time in the treatment area, which is why the milling cutter and the workpiece are slightly exposed to heat. High-speed milling is predominantly implemented using multi-coordinate numerically controlled numerical control (CNC) machines, but a steady cutting process cannot be ensured on existing equipment without upgrading the CNC system, the main movement drive, which would provide the required cutting speed and the use of a special tool.*

*The proposed method of milling curvilinear surfaces on CNC machines can be applied for milling processes of various cylindrical surfaces of complex profile with crossed axes of the tool and parts.*

**Key words:** high-speed milling, precision machining, machining performance, modular three-dimensional geometric modeling, tool oriented, shaping, camshaft, cam.

УДК 621.923.42  
DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/04>

**Кальченко В.І.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Кальченко В.В.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Венжега В.І.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Винник В.О.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Скляр В.М.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Кальченко Д.В.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ КУЛАЧКІВ РОЗПОДІЛЬЧОГО ВАЛА НА МОДЕРНІЗОВАНОМУ ВЕРСТАТІ В3208Ф4

*Стаття присвячена експериментальним дослідженням розробленого нового способу високошвидкісного фрезерування кулачків розподільних валів зі схрещеними осями інструмента й деталі на модернізованому для цього універсально-заточувальному верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК) моделі В3208Ф4 з метою підтвердження правильності розроблених раніше теоретичних моделей і проведених розрахунків.*

*На основі проведених раніше теоретичних розрахунків, розроблених 3D моделей і складених програм розрахунків зроблено висновок, що точність і якість обробки залежать головним чином від таких факторів: кута схрещення осі фрези з віссю розподільчого вала; припуску, що знімається, і швидкості різання.*

*Експериментально підтверджена ефективність фрез, оснащених надтвердими матеріалом (НТМ) на основі кубічного нітриду бору, що найбільшою мірою проявляється на багатокоординатних верстатах, оснащених сучасними системами керування, так як вони дають змогу реалізувати режими різання, близькі до оптимальних для інструменту з НТМ, і тим самим забезпечити продуктивність обробки та невеликий знос інструменту. Проведені за допомогою розробленого фотоелектричного датчика експериментальні дослідження зносу фрези з різальними елементами з кубічного нітриду бору показали незначні величини зносу.*

*Зафіксовані середні значення температури при різних рівнях взаємодії факторів не перевищили 250°C, що підтверджує теоретичне положення, за яким тепло, що виділяється під час обробки, практично повністю зосереджено в стружці й не перебуває тривалий час у зоні обробки, через що фреза й деталь мало схильні до високого термічного впливу.*

*Виміряна величина шорсткості обробленої поверхні за параметром  $R_a$  порівнянна із шорсткістю, отриманою методами абразивної обробки.*

**Ключові слова:** високошвидкісне фрезерування, модернізований верстат, фрези, оснащені кубічним нітридом бору, знос інструменту, теплонапруженість процесу, орієнтований інструмент, розподільний вал, кулачок.

**Постановка проблеми.** Значна частина продукції підприємств машинобудівного комплексу належить до групи тіл обертання. Однією з головних тенденцій сучасного машинобудування в умовах

ринкової економіки є забезпечення високих показників точності та якості оброблених поверхонь при високій продуктивності обробки. Ефективним способом обробки зовнішніх поверхонь обертання

є високошвидкісне фрезерування на багатокоординатних верстатах з ЧПК, яке використовують під час обробки шийок ступінчастих і колінчастих валів, кулачків розподільчих валів, гальмівних колодок тощо. Дослідження, удосконалення наявних і впровадження нових способів фрезерної обробки сприятиме підвищенню рівня конкурентоспроможності вітчизняних підприємств.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У роботах [1; 2] досліджено фрезерування деталей, що мають форму тіл обертання набором дискових фрез (спосіб Rotomille). Перевагою такого способу є можливість отримати поверхню деталі. Однак цей спосіб не отримав широкого застосування через складність виготовлення й експлуатації інструменту. Для забезпечення високої жорсткості системи необхідно обмежувати кругові подачі, що призводить до зменшення продуктивності обробки.

У роботі [3] розглядається спосіб обробки поверхонь обертання великого діаметра (наприклад, валків прокатних станів) двома торцевими фрезами, осі яких схрещуються з віссю оброблюваної заготовки. Різання при цьому здійснюється з поздовжньою подачею фрези вздовж осі заготовки. Однак у наведених дослідженнях висвітлено питання обробки лише стосовно довгих поверхонь із поздовжньою подачею інструменту та коротких у разі її відсутності. У роботах А.О. Етін [4] для окремих випадків запропоновано залежності, за якими визначаються похибки обробки в поперечному й поздовжньому перерізах заготовки при фрезеруванні циліндричних деталей.

Дослідження процесів фрезерування тіл обертання проведено в роботі [5].

У праці [6] наводиться геометричний аналіз похибок формоутворення при фрезеруванні поверхонь обертання торцевою фрезою.

У роботі [7] обробку довгомірних валів пропонується реалізувати за способом фрезоточіння. Як ріжучий інструмент застосовується дискова фреза, оснащена ріжучими елементами з надтвердих матеріалів (НТМ) збірної або цільної конструкції. У цьому разі фрезоточіння має такі переваги:

- чистовий різець обробляє заготовку з точністю до 8-го квалітету й шорсткістю  $R_a$  до 1,6 ... 3,2 мкм, фрезоточіння ж дає змогу поліпшити обидва параметри на 1–2 класи, оскільки, на відміну від різця, фреза має кілька ріжучих крайок, а отже, і більший ресурс стійкості;

- під час точіння на різець будуть діяти великі навантаження, для усунення яких доводиться знижувати подачу, зменшуючи продуктивність, а фреза здатна працювати в умовах високих навантажень при великій подачі;

- під час обробки фрезою стружка знімається кожним зубом фрези і дробиться на окремі частинки, тоді як під час обробки різцем для дроблення стружки доводиться використовувати стружколоми;

- можлива обробка заготовок із наявністю твердої кірки (поковок, виливок), а також важкооброблюваних матеріалів, так як зуб фрези в цьому разі буде плавно різати під кірку, що допомагає істотно знизити знос фрези і збільшити її стійкість;

- фрези, оснащені НТМ, можуть замінити операцію шліфування, забезпечуючи розмірну стійкість, так як, на відміну від шліфувального круга, не мають процесу викришення.

**Постановка завдання.** Мета статті – експериментально дослідити розроблений новий спосіб високошвидкісного фрезерування кулачків розподільчих валів зі схрещеними осями інструмента й деталі на модернізованому для цього універсально-заточувальному верстаті з числовим програмним керуванням (ЧПК) моделі В3208Ф4 з метою підтвердження правильності розроблених раніше теоретичних моделей і проведених розрахунків.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Універсально-заточувальний напівавтомат з ЧПК моделі В3208Ф3 у базовій комплектації призначений для заточування й доведення циліндричних інструментів по передніх і задніх поверхнях, розташованих на периферії й торцю, шліфувальними кругами в умовах дрібносерійного й одиничного виробництва.

У роботі [8] проведено дослідження точнісних і жорсткісних характеристик верстату з метою можливості використання його для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання. Обґрунтовано та запропоновано низку рішень з переобладнання системи ЧПК сучасною від персонального комп'ютера, що забезпечує одночасне управління по чотирьох координатах, окремих вузлів приводу головного руху, використання як інструменту дискових фрез, оснащених різальними пластинами з кубічного нітриду бору.

Модернізований для високошвидкісного фрезерування верстат складається з таких основних частин: станини 1; столу 2; каретки з колоною 3; механізмів поперечної 4, поздовжньої 5 та вертикальної 6 подачі; шліфувальної бабки 7; бабки виробу 8. Кінематична схема верстата наведена на рис. 1.

Конструкція верстата забезпечує такі переміщення робочих органів:

- обертання шліфувального круга;
- вертикальне переміщення шліфувальної головки;
- поперечне переміщення шліфувальної головки;



- поздовжнє переміщення столу;
- обертання виробу.

Обертання шпинделя здійснюється від електродвигуна М1 через поліклінову передачу зі змінними шківками. Вертикальне переміщення шліфувальної бабки – від електродвигуна М3 через черв'ячну передачу на передачу гвинт-гайка 6. Поперечне переміщення каретки й поздовжнє переміщення столу відбувається завдяки приводам із двигунами М2 і М5, що передають обертання на передачу гвинт-гайка кочення прямо через з'єднувальні муфти. Обертання виробу здійснюється від електродвигуна М4 через черв'ячну передачу.

На підставі теоретичних досліджень, розроблених 3D моделей і складених робочих програм доходимо висновку, що точність і якість обробки залежать головним чином від кута схрещення осі фрези з віссю розподільного вала –  $X_1$ , припуску, що знімається, –  $X_2$  і швидкості різання  $X_3$ , які приймаємо як технологічні фактори. Умови проведення дослідів наведено в таблиці 1.

Оброблювалися кулачки розподільного вала автомобіля КАМАЗ 740, виготовленого зі сталі 18ХГТ, термообробленого до твердості 40÷45 HRC дисковою фрезою діаметром 125 мм із різальними елементами з кубічного нітриду бору.

Під час проведення досліджень впливу технологічних параметрів обробки на точність використовувався повний факторний експеримент типу  $2^3$  при обліку взаємодій між факторами. Як план прийнято ортогональний план другого порядку. Так як наявна інформація про дисперсії та її однорідності недостатня, то проведені по три паралельні досліди в усіх точках плану.

Значення факторів вимірювалися й контролювалися такими приладами.

Схрещення осі фрези з віссю розподільного вала по лімбі верстата.

Припуск, що знімається, – системою ЧПК з точністю до 0,001 мм.

Швидкість різання – за допомогою змінних шківів при частоті обертання електродвигуна 2720 об/хв.

Як досліджувані параметри прийнято точність розмірів і форми обробленої поверхні, шорсткість, теплонапруженість процесу, знос різальних елементів фрези.

Для контролю лінійного зносу фрези використовувався розроблений датчик переміщення рис. 2, який дає змогу прово-

дити вимірювання й запис профілю інструмента без демонтажу оброблюваної на верстаті деталі.

В основі конструкції лежить принцип фотоелектричного датчика відстані з використанням оптиковолоконного кабелю. Принцип роботи цього датчика показано на рис. 2а. Світло, що випромінює лампа, проходить крізь оптиковолоконний кабель 2 (його центральну частину). На виході з кабелю пучок світла являє собою конус, який розходить під кутом  $\phi$  і відбивається від дзеркала 1. Він повертається в зовнішню частину кабелю й далі на фотодіод відповідного спектру, який підключено до вимірювального підсилювача

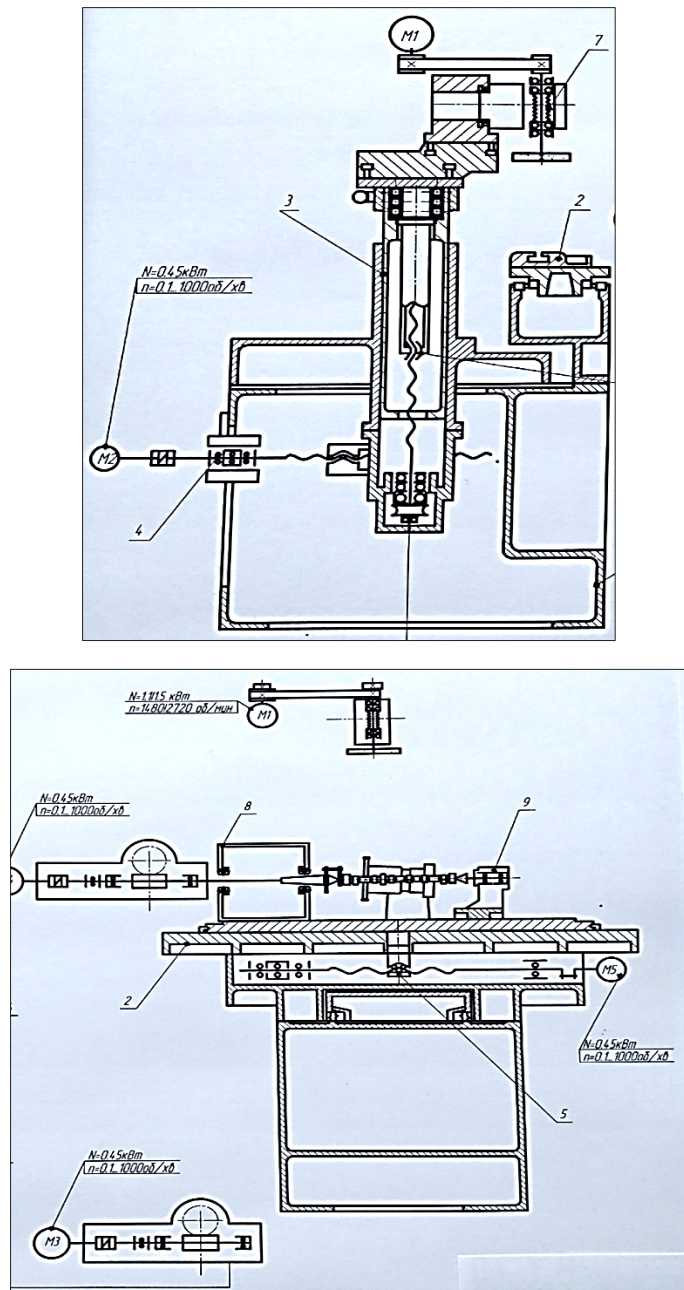


Рис. 1. Кінематична схема верстата ВЗ 208ФЗ

4. Підсилювач перетворює фотострум в електричний сигнал для контролю й запису відстані  $H$  від головки кабелю 2 до перешкоди 1. Лампа отримує живлення від стабільного джерела постійного струму.

Електрична принципова схема вимірювального підсилювача подана на рис. 2 г.

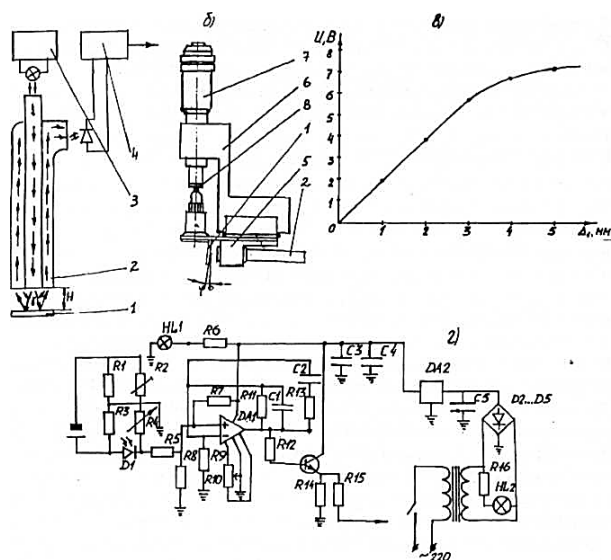


Рис. 2. Схема роботи й налагодження для тарювання оптико-волоконного датчика відстані

Вимірювальний міст складається з підібраних за опором резисторів  $R1$  і  $R3$ , підналагоджувальних резисторів  $R2$ ,  $R4$ , які використовуються для балансування моста, і фотодіода  $D$ . Сигнал розбалансування моста під час переміщення перешкоди 1 через резистор  $K5$  подається на підсилювач постійного струму, який виконано на операційному підсилювачі  $DA1$  зі стандартними ланцюгами корекції амплітудно-частотної характеристики.

З огляду на нестабільність характеристики відбивання від різальних елементів фрези, для контролю їх профілю розроблено спеціальний прилад. Він складається з твердосплавного наконечника, штанги, пружної пластини, дзер-

кала, кронштейна, кріплення оптичного кабелю, основи. Головка кабелю, закріплена в кронштейні гвинтовим затискачем. Пересування здійснюється за допомогою мікрометричного гвинта 7. З тарировочного графіка датчика видно, що він має лінійну характеристику в діапазоні від 0 до 3 мм. Розширення лінійної характеристики отримуємо за рахунок кутової ( $\phi_0$ ) орієнтації дзеркала 1 спеціального приладу.

Датчик закріплюється на кронштейні заднього центру. Під час роботи верстата датчик знаходиться в неробочій зоні й не перешкоджає обробці. Датчик під час вимірювання зносу має дві установки. При контролі профілю периферії подача здійснюється системою ЧПК уздовж осі фрези. При вимірі торця датчик закріплюється в інше положення, і подача виконується в осевій площині фрези, перпендикулярно до осі її обертання.

Проведені за допомогою датчика експериментальні дослідження показали найбільший знос інструмента при нижньому значенні факторів  $X_1$  та  $X_3$  і верхньому  $X_2$  порядку 5 мкм і найменший – приблизно 2 мкм при верхньому значенні факторів  $X_1$  та  $X_3$  і нижньому  $X_2$ .

Для визначення розподілу температури на поверхні деталі під час процесу фрезерування використовувався тепловізор моделі ULIRVISION TI-384 (рис. 3). Діапазон вимірювання приладу становить від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $350^{\circ}\text{C}$ , похибка вимірювання –  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Під час проведення вимірювання відбувається автоматичний захват максимальної температури й результат відображається на кольоровому дисплеї.

Зафіксовані середні значення температури при різних рівнях взаємодії факторів не перевищили  $250^{\circ}\text{C}$ , що підтверджує теоретичне положення, за яким тепло, що виділяється під час обробки, практично повністю зосереджено в стружці й не перебуває тривалий час у зоні обробки, через що фреза й деталь мало схильні до високого термічного впливу.

Таблиця 1

Умови проведення дослідів

Рівні й інтервали варіювання	Фактори		
	Схрещення осі фрези з віссю розподільчого вала – $X_1, ^{\circ}$	Припуск, що знімається, – $X_2, \text{мм}$	Швидкість різання $X_3, \text{м/хв}$
Нульовий рівень, $X_{i0}$	4	0,3	1067
Інтервал варіювання, $\Delta_i$	2	0,2	200
Верхній рівень, $X_{i0} + \Delta_i$	6	0,5	1267
Нижній рівень, $X_{i0} - \Delta_i$	2	0,1	867

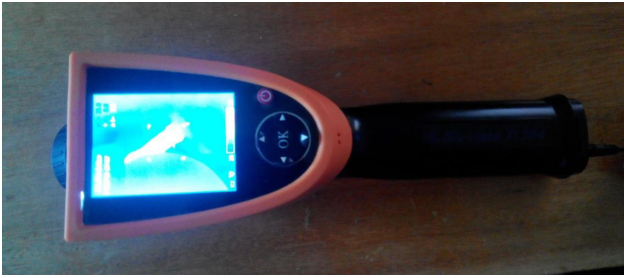


Рис. 3. Тепловізор моделі ULIRVISION TI-384

Параметри шорсткості вимірювалися малогабаритним профілометром Pocket Surf (рис. 4). Він дає змогу здійснювати вимірювання під різними кутами та в різних місцях. Принцип роботи приладу базується на прощупуванні нерівностей вимірювальної поверхні алмазною голкою шупа й перетворення механічних коливань шупа, що виникають при цьому, у зміну величини напруги. Зміна напруги пропорційна цим коливанням, які підсилюються, перетворюються у величину мікронерівностей і виводяться на екран приладу. Похибка вимірювання профілометра за параметром шорсткості  $R_a$  становить 3%. Профілограма шорсткості наведена на рис. 5. Величина шорсткості за параметром  $R_a$  зіставна із шорсткістю, отриманою методами абразивної обробки.

**Висновки.** Проведені за допомогою фотоелектричного датчика відстані експериментальні дослідження зносу фрези з різальними елементами з кубічного нітриду бору показали, що найбільший знос інструмента (порядку 5 мкм) – при найменшому значенні кута схрещення осей інструмента й заготовки та швидкості різання й найбільшому значенню припуску згідно з таблицею умов проведення дослідів. Найменший знос – приблизно 2 мкм при верхньому значенні факторів кута схрещення осей і швидкості й нижньому значенні припуску.



Рис. 4. Профілометр Pocket Surf

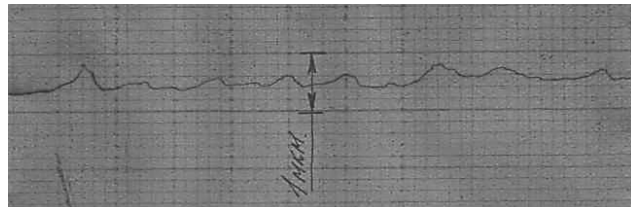


Рис. 5. Профілограма шорсткості обробленої поверхні кулачка

Зафіксовані середні значення температури тепловізором моделі ULIRVISION TI-384 при різних рівнях взаємодії факторів не перевищили  $250^{\circ}\text{C}$ , що підтверджує теоретичне положення, за яким тепло, що виділяється під час обробки, практично повністю зосереджено в стружці й не перебуває тривалий час у зоні обробки, через що фреза й деталь мало схильні до високого термічного впливу.

Величина шорсткості виміряна малогабаритним профілометром Pocket за параметром  $R_a$  1 мкм порівнянна із шорсткістю, отриманою методами абразивної обробки.

Отже, запропонований спосіб високошвидкісного фрезерування може бути застосований для обробки кулачків та опорних шийок розподільчих валів двигунів внутрішнього спалювання, валів коробок перемикачів швидкостей автомобілів і тракторів, що підвищує продуктивність і точність обробки, їх ресурс і надійність.

#### Список літератури:

1. Грязев М.В., Степаненко А.В. Перспективные технологии обработки поверхностей вращения фрезерованием. *Известия ТулГУ. Серия «Технические науки»*. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 130–136.
2. Технология механической обработки артиллерийских снарядов. Москва : Оборонгиз, 1948. 658 с.
3. Полетаев В.А., Волков Д.И. Особенности стружкообразования при фрезеровании и фрезоточении тел вращения. *Инженерный журнал*. 2001. № 7. С. 18–21.
4. Этин А.О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. Москва : Машиностроение, 1964. 324 с.
5. Полетаев В.А. Конструктивные особенности приводов подач станков для кругового фрезерования. *Инженерный журнал*. 2001. № 8. С. 63–64.
6. Грязев М.В., Степаненко А.В. Фрезерование наружных цилиндрических поверхностей торцовой фрезой. *Известия ТулГУ. Серия «Технические науки»*. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 140–148.
7. Гречишников В.А., Приходько А.С., Романов В.Б. Фрезы, оснащенные СТМ для обработки тел вращения сложной формы на токарном станке. *Известия Тульского государственного университета. Серия «Технические науки»*. 2017. № 8. Ч. 2. С. 69–74.



8. Модернізація універсально-заточувального верстата з ЧПК ВЗ 208 ФЗ для високошвидкісного фрезерування поверхонь обертання / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, В.І. Венжега, В.О. Винник. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 72–80.

**Kalchenko V.I., Kalchenko V.V., Wenzhega V.I., Vinnik V.A., Sklar V.M., Morochko V.V.**  
**EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF HIGH-SPEED MILLING SHAFT ROLLS**  
**ON MODERNIZED VZ208F4 MACHINE**

*The article is devoted to the experimental researches of the developed new method of high-speed milling of camshaft cams with crossed axes of a tool and details on the modernized for this purpose the universal-sharpening machine of the CNC model VZ208F4 in order to confirm the correctness of previously developed theoretical models.*

*Based on the theoretical calculations made earlier, the 3D models developed and the complex calculation programs, it is concluded that the accuracy and quality of processing depend mainly on the following factors: the angle of intersection of the milling axis with the camshaft axis; removable allowance and cutting speed.*

*The efficiency of cutters equipped with NTM based on cubic boron nitride is experimentally confirmed, which is mostly manifested on multi-coordinate machines equipped with modern control systems as they allow to realize cutting modes close to the optimal ones for the tool with NTM, and thus to provide low productivity and tool. Experimental studies of the wear of a cutter with cutting elements made of cubic boron nitride, carried out with the help of a developed photoelectric sensor, showed negligible wear values.*

*The recorded average values of temperature at different levels of interaction of factors did not exceed 2500C, which confirms the theoretical position that the heat released during processing is almost completely concentrated in the chips and does not stay for a long time in the processing zone, which is why the milling cutter and the part are slightly inclined to high thermal effects.*

*The measured roughness measured by the treated surface by parameter Ra is comparable to the roughness obtained by abrasive method.*

**Key words:** *high-speed milling, modernized machine, mills equipped with cubic boron nitride, tool wear, heat stress of the process, oriented tool, camshaft, cam.*



## АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.526

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/05>

**Березанський В.Г.**

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

**Березанський О.Г.**

Військовий коледж сержантського складу

Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

**Баранік О.М.**

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

**Константинов А.О.**

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

**Свінцицький В.В.**

Командування Повітряних Сил Збройних Сил України

### ПІДХІД МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ СНАРЯДІВ АВІАЦІЙНИХ ПАТРОНІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ УЗАГАЛЬНЕНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ

*Стаття знайомить із дослідженням напрямів удосконалення елементів конструкції снарядів авіаційних артилерійських патронів. Виявлено шляхи зменшення зношування внутрішньої частини каналу ствола авіаційної артилерійської зброї в системі «ствол-снаряд». Запропоновано метод узагальненого параметричного моделювання для вирішення завдання механічного зношування каналу ствола та забезпечення експлуатаційної характеристики ствола – живучості.*

*Для чинної системи авіаційної артилерійської зброї одним із напрямів їх удосконалення є застосування новітніх технологій матеріалів саме в конструкції авіаційних артилерійських патронів.*

*У результаті аналізу зношування каналу ствола авіаційної артилерійської зброї встановлено, що метод узагальненого параметричного моделювання тактико-технічних характеристик ствола дає змогу виявити тенденції підвищення живучості ствола авіаційної артилерійської зброї під час виконання новітніх технологій у сфері виробництва авіаційного озброєння. Такий підхід дає змогу враховувати параметри та характеристики елементів і систем, що змінюються в процесі експлуатації та бойового застосування зразків, і сформувати напрями вдосконалення авіаційної артилерійської зброї.*

*Проведено порівняльну оцінку живучості ствола авіаційної артилерійської зброї з урахуванням зміни конструкції снаряду та матеріалів ведучих поясків. Аналіз отриманих результатів свідчить, що в умовах застосування новітніх матеріалів ведучих поясків (полімерів) у конструкції снарядів існує можливість підвищення живучості ствола авіаційної артилерійської зброї у 2,5 рази. Визначено один із альтернативних напрямів удосконалення конструкції авіаційного снаряду, а саме елемента ведучого пояска снаряду, який забезпечить зменшення механічного зношування авіаційного артилерійського ствола з урахуванням форми конструкції та матеріалу ведучого пояска.*

**Ключові слова:** снаряд, патрон, ведучий пояс, живучість, ствол, зношування, коефіцієнт тертя.

**Постановка проблеми.** Авіаційний артилерійський патрон являє собою складну конструкцію, особливо снаряд патрона. Він виготовляється з високою технологічною складністю, однак, незважаючи на таку складність, елементи конструкції

снаряду під час взаємодії з поверхнею каналу ствола негативно впливають на механічне зношування ствола під час стрільби.

Наявна конструкція снаряду включає мідний ведучий пояс, який, взаємодіючи з нарізною

частиною ствола авіаційної артилерійської зброї (далі – ААЗ), приводить до втрати живучості ствола.

На живучість ствола ААЗ впливають температурні процеси в каналі ствола, що посилюють механічне зношування каналу ствола, які залежать від довжини черги та кількості черг під час стрільби зі зброї, паузами між чергами, наявністю системи охолодження зброї, останнім часом, невідповідність балістичних характеристик порохових зарядів авіаційних патронів під час їх тривалого зберігання [1, с. 7].

Найбільш вагомим і негативним є механічне зношування каналу ствола ААЗ, яке викликано передусім складними фізико-хімічними процесами в каналі ствола, що призводить до його деформації та втрати живучості ствола.

Сьогодні основними тенденціями вдосконалення ААЗ є пошук і застосування нових фізичних принципів дії зброї, підвищення точності бойового застосування зброї, а також удосконалення конструкції авіаційних боєприпасів.

Одним із шляхів удосконалення наявної системи ААЗ, на просторі СНД, є удосконалення конструкції авіаційних артилерійських патронів, шляхом застосування в конструкції снарядів і патронів матеріалів, які призводять до зменшення швидкості зношування ствола.

У зв'язку з цим актуальним залишається завдання дослідження впливу матеріалів в елементах конструкції снарядів авіаційних артилерійських патронів з метою підвищення живучості ствола під час технічної експлуатації ААЗ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У результаті аналізу науково-технічних публікацій [2–6] визначено, що процес механічного зношування каналу ствола являє собою складне завдання й потребує системного підходу з урахуванням трибомеханічних процесів у стволі. Дифузні процеси, що відбуваються у стволі, необхідно враховувати під час моделювання зношування ствола під час вибору марки пороху, марки сталі та фрикційних матеріалів, що взаємодіють із внутрішньою частиною ствола.

Поняття зношування ствола та живучість ствола тісно пов'язані між собою, тому дослідження завдання доцільно розглядати як єдине ціле у вигляді системи «ствол-снаряд».

Так, у праці [2, с. 11] розглядаються основні причини зношування нарізних стволів: максимальний тиск і температура порохових газів у стволі, тиск снаряда на бічну грань нарізу, тертя об поверхню каналу при русі кулі по нарізах.

При цьому змінними величинами є тиск порохових газів і швидкість горіння порохового заряду, які прямо залежать від стану порохового заряду. Автори запропонували вираз Габо-Слухоцького для оцінювання зміни живучості ствола під час використання боєприпасів різних строків експлуатації.

Автори в роботі [3, с. 116] стверджують, що в разі тривалого зберігання боєприпасів максимальний тиск зростає, а дульний тиск падає. Запропоновано модель для відносного аналізу стану й прогнозування живучості стволів стрілецької зброї, але вона орієнтована на нові боєприпаси зі свіжими порохами.

У роботі [4, с. 86] автор приводить методика В.А. Балакіна експериментального визначення сил тертя в процесі пострілу, однак методикою можна користуватися тільки на початковій ділянці руху, коли швидкість снаряду ще досить мала.

Авторами [5, с. 129] проведено аналіз методик визначення коефіцієнтів тертя під час використання різних матеріалів, представлено залежність коефіцієнта тертя від температури, модель С.І. Голубкіна. Представлені методики дають змогу використовувати не довідникові величини коефіцієнта тертя, а значення коефіцієнтів тертя для різних умов тертя й матеріалів.

Одним із підходів дослідження тактико-технічних характеристик (далі – ТТХ) озброєння та військової техніки на етапах проектування й у процесі модернізації автори пропонують підхід на базі методу узагальненого параметричного моделювання складних систем [6, с. 23], який дає змогу провести параметричний аналіз з обґрунтуванням параметрів елементів озброєння.

**Постановка завдання.** Мета статті – обґрунтування напрямів удосконалення конструктивних параметрів снарядів сучасних авіаційних артилерійських патронів для забезпечення експлуатаційних характеристик ствола авіаційної артилерійської зброї.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Живучість ствола ААЗ є важливою експлуатаційною характеристикою зброї, яка в 3–5 разів менша щодо ресурсу ААЗ. Таке співвідношення вимагає постійного пошуку підходів до підвищення живучості стволів ААЗ.

На зношування поверхні каналу ствола впливає багато факторів: конструктивних, технологічних, балістичних, експлуатаційних [2, с. 11]. Основним негативним фактором є тертя мідного ведучого пояса (далі – МВП) снаряда під час його руху по каналу ствола.

Дослідженням процесу зношування стволів як стрілецької, так й автоматичної зброї займалася низка вчених, які процес зношування ствола розглядали як систему «ствол-патрон». Під час взаємодії снаряду з каналом ствола виникає сила тертя  $F_{\text{тр}}$ , яка залежить від радіального контактного напруження  $\sigma_r$  і коефіцієнта тертя  $f$ .

Процес фрикційної взаємодії ведучого пояска з нарізами каналу ствола супроводжується зношуванням обох елементів пари тертя, яка розглядається [4, с. 84].

Для виготовлення стволів на цей час використовуються певні марки сталей. Хімічний склад і механічні якості цих сталей дещо впливають на живучість стволів. Одним із представників таких сталей є марка сталі 30ХН2МФА.

Нагрівання гарматних стволів є серйозною перешкодою збільшення темпу стрільби зброї, так як підвищення темпу стрільби та довжини черги зброї пов'язано зі збільшенням інтенсивності нагрівання, що призводить до підвищення температури внутрішньої поверхні ствола і, як наслідок, підвищення інтенсивності зношування живучості ствола.

У зв'язку з виникненням температурних напружень виникає необхідність під час проектування стволів ААЗ оцінювати їх вплив на загальний напружений стан розігрітого ствола під час пострілу. Зменшення температурних напружень у стволі можливе в разі використання пари тертя «метал-неметал». Такий підхід можливий під час використання досягнень науки та техніки й технологій отримання матеріалів-неметалів ведучого пояска, що мають менший питомий тиск на бойову грань нарізу ствола.

Для вирішення завдання дослідження пропонується метод узагальненого параметричного моделювання, який дає змогу застосувати параметричний аналіз визначених ТТХ ААЗ та провести оцінювання за узагальненим критерієм з урахуванням варіації й специфіки параметрів. Цільову функцію для узагальнених параметрів  $P = \{p_i\}$  з обмеженнями в задачі, що досліджується, представимо у вигляді:

$$F(p) \rightarrow \min; \quad L(p, \sigma, f, t) = 0; \quad G_j \leq [G_j]; \quad T_k \geq [T_k], \quad (1)$$

де  $F$  – цільова функція,  $L$  – оператор, що описує фізико-механічний процес або стан об'єкту у вигляді просторово-часового розподілу;  $G_j$ ,  $[G_j]$  – характеристики процесів і станів, а також граничні їх величини,  $j=1, \dots, N_G$ ;  $T_k$ ,  $[T_k]$  – фактичні

та задані ТТХ, ієрархічні рівні компонент ТТХ зразка озброєння,  $k=1, \dots, N_T$ .

У цьому разі опис процесу зношування каналу ствола під час пострілів представляє дослідження задачі внутрішньої балістики та співвідношення процесу взаємодії динамічного навантаження каналу ствола з радіальною контактною напругою й коефіцієнтом тертя:

$$L_1(p_d, v_d, q_d, t) = 0; \quad (2)$$

$$L_2(q_d, \sigma, t) = 0, \quad (3)$$

де  $p_d$  – параметри внутрішньої балістики ствола (дульна швидкість, дульний тиск, маса порохового заряду);  $v_d$  – змінні, що описують положення снаряда у каналі ствола;  $q_d$  – кінематичні та силові характеристики системи «ствол-снаряд»;  $\sigma$  – змінні, що описують систему тіл «ствол-снаряд».

Використовуючи системний підхід, задачу механічного зношування авіаційного артилерійського ствола можемо представити у вигляді ієрархічної структури з деталізацією характеристик зброї та матеріалів (рис. 1). Матеріал ведучих поясків снарядів представлено як металів, так і різновидності пластмас – пластмасові ведучі пояска (далі – ПВП).

Задача визначення балістичних характеристик снарядів і зміни їх властивостей у результаті зміни маси патрона може бути вирішена на основі комплексного застосування теоретичних методів з вирішенням задач внутрішньої балістики.

Дослідження мікротвердості каналу ствола по глибині проведемо враховуючи фізичний зміст коефіцієнта тертя:

$$f = \frac{F_d}{N} + \frac{F_a}{N} = f_d + f_a, \quad (4)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя;  $F_d$  та  $F_a$  – деформаційний та адгезійний складники сили тертя;  $N$  – гравітаційний складник тертя,  $f_d$  та  $f_a$  – деформаційний та адгезійний складники коефіцієнта тертя.

Сьогодні ширшого використання набувають полімерні матеріали в механізмах ковзання й тертя поряд із металами [7, с. 106]. Для двох пар тертя «метал-метал» і «метал-неметал» визначені коефіцієнти тертя за методиками [5; 7]. Результати розрахунків коефіцієнтів тертя для пар представлені в таблиці 1.

Аналіз результатів у таблиці 1 свідчить, що внаслідок застосування новітніх матеріалів ведучих поясків існує можливість зменшення сили

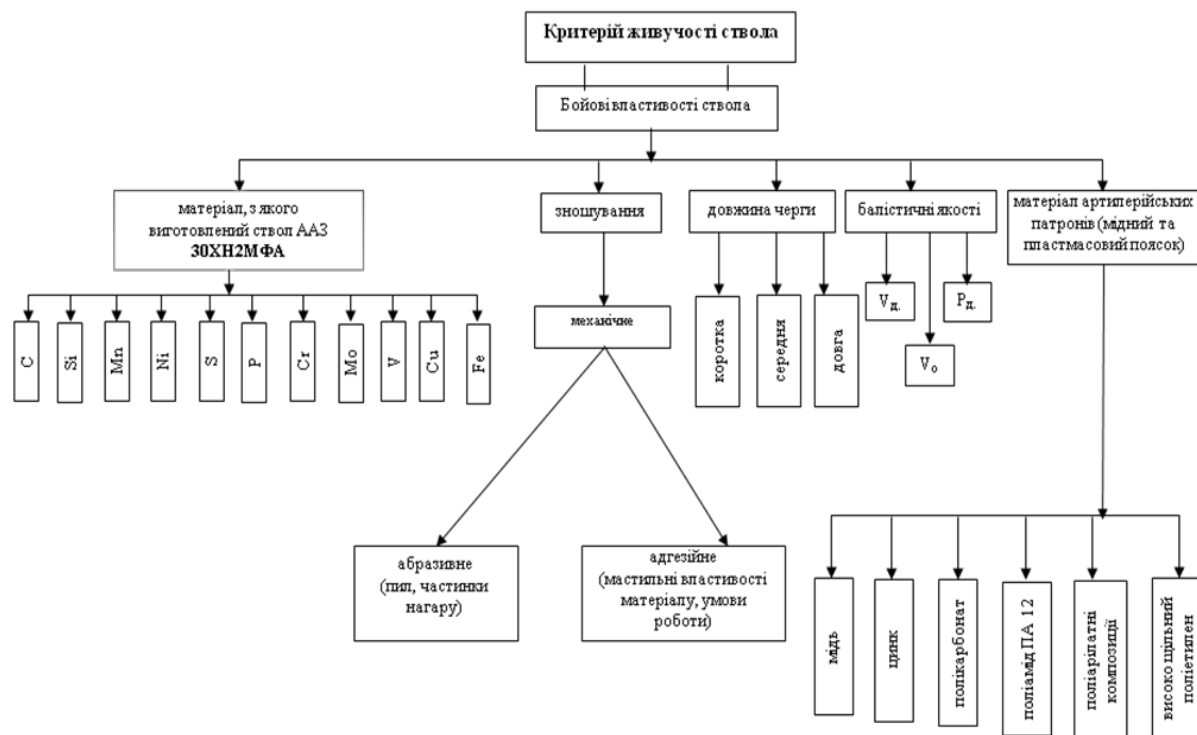


Рис. 1. Ієрархічна структура взаємодії системи «ствол-снаряд»

Таблиця 1

Коефіцієнт тертя для пари матеріалів

Матеріал ствола	Матеріал ведучого пояса снаряду в парі тертя			
	Значення коефіцієнту тертя пари			
	«Сталь-сталь»	«Сталь-бронза»	«Сталь-мідь»	«Сталь-полікарбонати»
Марка сталі: <b>30ХН2МФА</b> з хромуванням ствола	0,133	0,176	0,15	0,06

тертя в каналі ствола та його температурного навантаження.

Ураховуючи, що сьогодні відбувається експлуатація патронів з продовженими ресурсними показниками, оцінювання живучості ствола ААЗ проведемо за методикою [2, с. 114] для авіаційної гармати калібру 30 мм з відповідними конструктивними параметрами зброї та патрона.

Зважаючи, що тривале зберігання авіаційних патронів в умовах авіаційних баз і складів призводить до відхилення важливої балістичної характеристики – початкової швидкості  $V_0$  снаряду, для врахування в критерії живучості ствола балістичних змін снаряду запропоновано рівняння (5) у вигляді полінома другого ступеня, у якого коефіцієнт кореляції величин становить 0,94 (див. рис. 2).

Характер розсіювання початкової швидкості снарядів залежно від відхилення маси патронів із продовженими ресурсними показниками має вигляд:

$$V_0 = -0,842m^2 + 1\,400,985m - 581\,942,329, \quad (5)$$

де  $V_0$  – початкова швидкість снаряду;  $m$  – маса патрона за тривалого зберігання.

За обраною методикою оцінювання живучості ствола ААЗ [2] та з урахуванням залежності (5) у разі тривалого зберігання патронів проведено розрахунок живучості ствола. Результати розрахунків живучості ствола ААЗ з урахуванням вибору матеріалів ведучих поясів снаряду (коефіцієнтів тертя пар) представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати обчислення живучості ствола гармати

Характеристика	Матеріал ведучого пояса			
	Сталь	Бронза	Мідь	Полікарбонат
Живучість ствола $N_p$	685	754	891	2153

Аналіз результатів у таблиці 2 свідчить, що внаслідок застосування новітніх матеріалів ведучих поясків існує можливість підвищення живучості ствола у 2,5 раза.

Авторами в результаті дослідження впливу матеріалів конструкції ведучих поясків снарядів на живучість ствола пропонується використання полімерних матеріалів і їх похідних у конструкції снарядів патронів причому з подальшою інтеграцією елемента в єдиний корпус снаряду для збільшення ефективності функціонування ведучих поясків.

Математичні моделі конструкції снаряду авіаційного патрона описуються системою рівнянь [8, с. 107] і доповнені рівняннями, що описують змінену конструкцію снаряду, які реалізовані в програмному пакеті MathCad у вигляді ескізів снарядів. У результаті математичного моделювання отримані ескізні варіанти можливих удосконалених конструкцій снарядів з використанням новітніх матеріалів, що представлені на рис. 3, 4.

На рис. 4а представлено варіант ескізу снаряду з двома полікарбонатними ведучими поясками. Варіант ескізу снаряду рис. 4б підвищує характеристики центрування снаряду під час його руху по каналу ствола.

З аналізу ескізів снарядів БТ-30 випливає, що процес керування механічного зношування ствола залежить від вибору матеріалів фрикційної пари «метал-неметал» шляхом варіювання хімічних структур матеріалів ведучих поясків снаряду, а також вибору перспективного матеріалу ствола.

Результати моделювання ескізів снаряду БТ-30 щодо вибору матеріалу елементів конструкції снаряду доцільно враховувати під час проектування перспективних ТТХ снарядів шляхом удосконалення конструкції авіаційних снарядів для зменшення температури нагрівання ствола.

Отже, представлено підхід підвищення живучості ствола ААЗ за рахунок варіювання

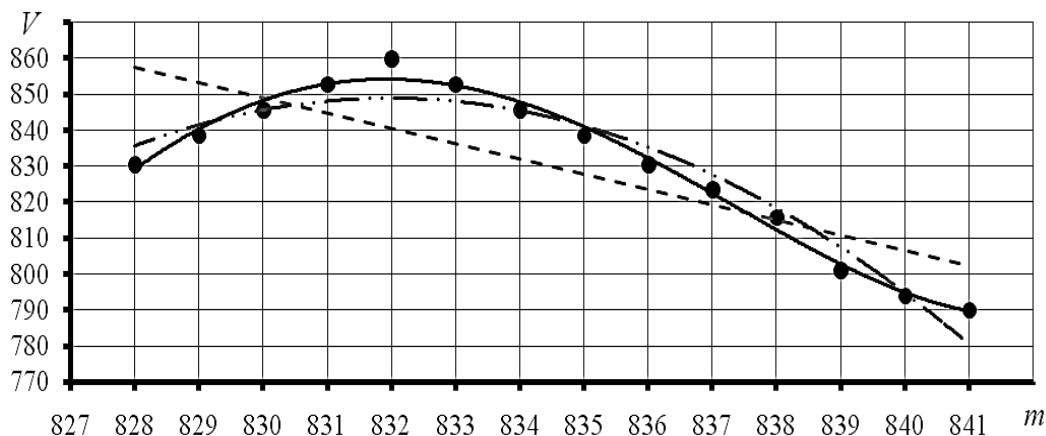


Рис. 2. Відхилення  $V_0$  від зміни маси патронів під час тривалого зберігання:  
 - - - лінійна апроксимація; \_ . \_ апроксимація поліномом другого ступеня;  
 — апроксимація поліномом четвертого ступеня

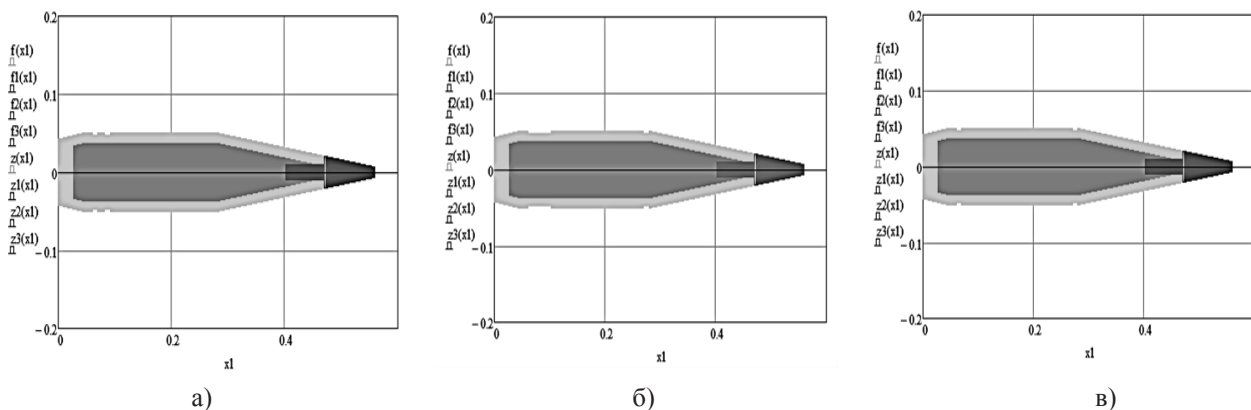


Рис. 3. Моделювання ескізів снарядів БТ-30 із різною конфігурацією форми корпусу снарядів під ведучий поясик: а) дві виїмки у хвостовій частині снаряду; б) дві виїмки, одна розширена у хвостовій та одна – в оживальній частині снаряду; в) дві звичайні виїмки, по одній у хвостовій та оживальній частині снаряду



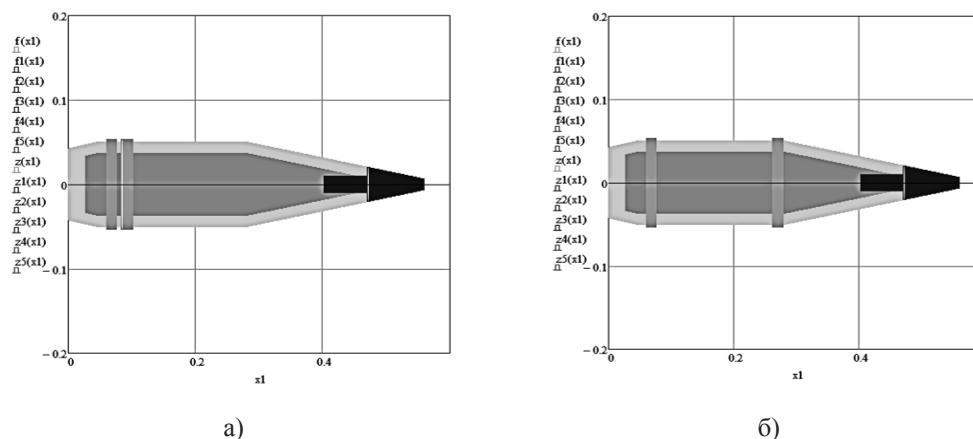


Рис. 4. Моделювання ескізів снарядів БТ-30: а) з двома ведучими поясками у хвостовій частині снаряду; б) з двома ведучими поясками, по одному в оживальній і хвостовій частинах снаряду

хімічних структур матеріалів ведучих поясків снаряду, який дає змогу зменшити температурні напруги у стволі та збільшити інтервал часу механічного зношування ствола.

Вирішення задачі температурного балансу ствола під час використання фрикційної пари «метал-неметал» і «холодного» піроксилінового порошу дасть змогу в сукупності підвищити щільність заряджання порошу і, як наслідок, початкову швидкість снаряду та глибину пробиття перешкоди для бронебійних снарядів.

**Висновки.** Визначено один із альтернативних напрямів удосконалення елементу конструкції

авіаційного снаряду, який забезпечить зменшення механічного зношування авіаційного артилерійського ствола з урахуванням форми конструкції та матеріалу ведучого пояска.

Запропоновано метод параметричного моделювання тактико-технічних характеристик ААЗ у системі «ствол-снаряд». Порівняльний аналіз живучості ствола показав, що під час використання новітніх технологій у виробництві авіаційних боєприпасів можливе підвищення живучості ствола у 2,5 раза щодо використання мідного ведучого пояска протягом заданого часу експлуатації ствола.

#### Список літератури:

1. Березанський В.Г. Методика визначення прицільних поправок стрільби з урахуванням зміни маси авіаційних артилерійських патронів під час їхнього тривалого зберігання в умовах авіаційних бригад. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. Київ, 2020. № 1. Том 31 (70). Частина 1. С. 6–13.
2. Аніпко О.Б., Баулін Д.С., Муленко О.О. Проблема живучості стрілецької зброї при використанні боєприпасів після гарантійних строків зберігання. *Збірник наукових праць Академії внутрішніх військ МВС України*. 2010. Вип. 2 (16). С. 11–13.
3. Бірюков І.Ю., Баулін Д.С. Експлуатаційні характеристики стрілецького озброєння при використанні боєприпасів довготривалого зберігання. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2008. Вип. 2. С. 113–117.
4. Писаренко В.Г. Аналіз проблем зношування стволів стрілецької зброї. *Проблеми трибології*. В. : КНВО «Форт» МВС України, 2012. Вип. 2. С. 84–90.
5. Радченко А.К., Орел А.Г., Радченко Л.А. Коэффициент сухого трения. *Современные проблемы физического материаловедения*. Киев : ИПМ НАН Украины, 2012. Вып. 21. С. 211–223.
6. Забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень / А.В. Грабовський, А.Ю. Васильєв, М.М. Ткачук, А.Ю. Танченко, О.В. Мартиненко, Д.В. Киричук, С.В. Борисенко, О.І. Касай. Харків : Вісник НТУ «ХПІ», 2016. Вип. 18 (1190). С. 22–29.
7. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред. А.В. Чичинадзе. Москва : Машиностроение, 2001. 664 с.
8. Гончаренко П.Д., Котасонов Ю.І., Хайков В.Л. Моделювання процесів вражаючої дії артилерійських боєприпасів з використанням комп'ютерного обчислювального експерименту : навчальний посібник. Севастополь : Академія ВМС ім. П.С. Нахімова, 2012. 216 с.

Berezanskyi V.G., Berezanskyi O.G., Baranik O.M., Konstantinov A.O., Svintsitskyi V.V.

**APPROACH TO MODELING CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF AVIATION**

**AMMUNITION SHEARS USING THE GENERALIZED PARAMETRIC METHOD**

*The article acquaints with research of directions of perfection of elements of a design of shells of aviation artillery cartridges. Ways to reduce the wear of the inner part of the barrel of the aircraft artillery barrel in the "barrel-projectile" system have been identified. The method of the generalized parametric modeling for the decision of a problem of mechanical wear of a trunk channel and maintenance of operational characteristic of a trunk – survivability is offered.*

*For the existing system of aviation artillery weapons, one of the areas of their improvement is the use of the latest material technologies in the design of aviation artillery cartridges.*

*As a result of the analysis, the barrel channel of the air artillery was installed, it is established that the method of generalized parametric modeling of tactical and technical characteristics of the barrel allows to identify trends in increasing the survivability of the barrel of aircraft artillery when using critical technologies in aircraft production. This approach allows to take into account the parameters and characteristics of elements and systems that change during the operation and combat use of samples, and to form areas for improvement of aviation artillery weapons.*

*The assessment of the survivability of the barrel of the air artillery system was carried out for the construction of the shell and the materials of the lead belts. Analysis of the positive results, but in the minds of new and new materials of lead belts (polymers) in the construction of shells, there is a possibility of improved barrel life 2.5 times more artificially. One of the alternate strands is indicated for the more convenient construction of an avia projectile, and the element of the leading belt for the projectile is designed to provide for the reduction of mechanical artifact of the artillery barrel in the form of construction.*

**Key words:** projectile, cartridge, guide belt, survivability, barrel, wear, coefficient of friction.



**Нечипоренко О.М.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ВИСОТИ ПОЛЬОТУ КВАДРОКОПТЕРА ПІДВИЩЕНОЇ НАДІЙНОСТІ

*У статті представлені аналіз і результати дослідження системи автоматичного керування рухом квадрокоптера, системи його автоматичної посадки, а також розробленої системи вимірювання висоти польоту квадрокоптера підвищеної надійності, що забезпечує безаварійну посадку. У розробленій системі вимірювання висоти реалізований метод підвищення надійності і точності технічних об'єктів шляхом комплексного поєднання функціонального і структурного резервування, що дозволить підвищити надійність і точність системи автоматичної посадки.*

*Метою дослідження є забезпечення автоматичної безаварійної посадки квадрокоптера. Для досягнення мети запропоновано збільшити надійність і точність системи автоматичної посадки шляхом використання додаткової системи вимірювання висоти польоту квадрокоптера, в якій реалізовано поєднання функціонального і структурного навантаженого резервування, тобто об'єднання в системі вимірювання висоти одного ультразвукового віддалеміра з двома барометричними висотомірами. Фактично це поєднання функціонального резервування, тобто комплексування барометричного і ультразвукового засобів вимірювання висоти польоту, які мають однакове функціональне призначення, але використовують різні фізичні принципи вимірювання, і структурного резервування (об'єднання двох однотипних датчиків – двох однакових барометричних висотомірів). Вибір ультразвукового віддалеміру і барометричного висотоміру для спроектованої системи вимірювання висоти ґрунтується на тому, що ці датчики найбільш надійно працюють за надмалих висот польоту квадрокоптера, особливо під час його посадки.*

*У статті представлена математична модель динамічних процесів об'єкта дослідження. В дослідженні були використані такі методи: структурного та функціонального резервування, узагальнений метод найменших модулів і оптимальної фільтрації, методи математичної статистики.*

**Ключові слова:** квадрокоптер, висота польоту, надійність, резервування, барометричний висотомір, ультразвуковий віддалемір.

**Постановка проблеми.** Контроль висоти є важливим для автономного польоту квадрокоптера і забезпечення його безаварійної автоматичної посадки. Завданням стабільного контролю висоти є отримання точних даних про висоту із низьким рівнем шуму, які є основою кожної системи керування.

Для безаварійної посадки квадрокоптера необхідно значно підвищити надійність і точність автоматичного підтримання висоти польоту, реалізувати функцію Altitude Hold Mode, коли безпілотний літальний апарат (БпЛА) легко зависає у повітрі й утримується в зафіксованому положенні над землею. І, як наслідок, підвищити точність вимірювання вертикального складника вектора навігаційних координат місцеположення БпЛА, тобто висоти його польоту, а також підвищити надійність засобів вимірювання висоти, особливо під час його посадки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У публікації [1, с. 476–480] представлений алго-

ритм, призначений для вимірювання висоти польоту квадрокоптера над землею, який реалізований об'єднанням інерційного, барометричного, ультразвукового датчиків з двома інфрачервоними датчиками вимірювання висоти. За допомогою цього алгоритму було здійснено контроль висоти та автономну посадку квадрокоптера; при цьому безаварійність посадки не розглядалась. Мініатюрний барометричний висотомір (БВ), що знаходиться на борту БпЛА, надто схильний до зовнішніх шумів, яким піддається. Частина проблем, пов'язаних із шумами БВ, можна вирішити шляхом комплексування двох датчиків [2, с. 35]: БВ і ультразвукового віддалеміру (УВ) [3, с. 18–26], але комплексування, яке з погляду надійності являє собою функціональне резервування [4, с. 22], не дає можливості уникнути шумів на висоті нижче 1,5 м і недостатньо збільшує надійність системи автоматичної посадки в умовах атмосферних збурень.

У статті [5, с. 2–5] представлені способи реалізації автономного зльоту та посадки квадро-

коптера на стаціонарну платформу за допомогою вимірювання висоти польоту лідаром, але використання лідару надто збільшує масо-габаритні розміри і вартість квадрокоптера.

У статті [6, с. 67–69] описана система посадки квадрокоптера, яка складається з двох взаємопов'язаних підсистем: 1) системи розпізнавання і вибору найбільш безпечної площадки для автоматичного приземлення квадрокоптера в разі втрати сигналу за відмови системи автоматичного повернення; 2) парашутної системи, яка в разі аварії квадрокоптера в повітрі дозволить автоматично управляти його спуском на парашуті в напрямку найбільш безпечного майданчика для приземлення.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка системи автоматичної безаварійної посадки квадрокоптера підвищеної надійності.

Для досягнення мети запропоновано збільшити надійність і точність системи автоматичної посадки шляхом використання додаткової системи вимірювання висоти польоту БпЛА, в якій реалізовано поєднання функціонального і структурного навантаженого резервування, тобто об'єднання в системі вимірювання висоти (СВВ) одного датчика УВ з двома датчиками БВ. Фактично це поєднання функціонального резервування (комплексування БВ і УВ, які мають однакове функціональне призначення, але використовують різні фізичні принципи вимірювання) і структурного резервування (об'єднання двох однотипних датчиків – двох однакових БВ). Крім того, вибір УВ і БВ для СВВ ґрунтується на тому, що ці датчики найбільш надійно працюють за надмалих висот польоту БпЛА [2, с. 34].

Є інші відомі технічні рішення, які надають дані щодо висоти, – GPS-приймач диференціального глобального позиціонування, приймач оптичної системи стеження, системи технічного зору з використанням відеокамери, але вони мають такі недоліки: великі витрати, велика вага, потреба зовнішнього зв'язку або двофазного середовища, обмежений діапазон вимірювань. Крім того, методи комплексування вихідних даних (фільтр частинок, байєсовський фільтр, нейронні мережі тощо) занадто складні і потребують довготривалого часу обробки.

На відміну від цих складних підходів, у цій статті представлена система вимірювання висоти (СВВ) з простим алгоритмом визначення і контролю висоти для автономної посадки, який економить час обробки, підвищує надійність і точність системи автоматичної посадки (САП) і системи автоматичного керування рухом квадрокоптера.

### Виклад основного матеріалу дослідження.

Для аналізу надійності об'єкту дослідження, впливу на його надійність складових елементів і зв'язків між ними необхідно було розробити його детальну схему.

Структурна схема системи автоматичного керування (САК) рухом квадрокоптера представлена на рис. 1.

САК складається з апаратури радіокерування (пульту, передатчика, приймача); бортового мікропроцесора (польотного контролера, системи керування кутовим положенням, системи керування центром мас квадрокоптера); навігаційної системи визначення місцеположення і орієнтації квадрокоптера (інерційно-вимірювального модуля (ІВМ), який включає в себе трьохосовий акселерометр та датчик кутових швидкостей (ДКШ)); механічної частини квадрокоптера (чотирьох гвинтомоторних груп (ГМД)). Кожна ГМД складається з регулятора обертів безколекторного двигуна (РОБД), двигуна і пропелера.

Система працює таким чином: за допомогою пульта радіокерування пілот (квадровод) задає кути відхилення по крену  $\gamma_3$ , тангажу  $\vartheta_3$ , ристанню  $\psi_3$ , а також сумарну тягу квадрокоптера  $R_3$ .

На виході польотного контролера тяга  $R_3$ , кути відхилення по крену  $\Delta\gamma_3$ , тангажу  $\Delta\vartheta_3$ , ристання  $\Delta\psi_3$  потрапляють на систему керування кутовим положенням квадрокоптера, що розраховує потрібні тяги  $F_1, F_2, F_3, F_4$  для кожного виконавчого двигуна і виробляє керуючі сигнали для чотирьох РОБД.

На виході кожного РОБД генеруються напруги  $U_1, U_2, U_3, U_4$  для обмоток двигунів. Моменти двигунів  $M_1, M_2, M_3, M_4$  передаються на чотири пропелера. Тяги  $F_1, F_2, F_3, F_4$  і реактивні моменти  $M^1_{y1}, M^2_{y1}, M^3_{y1}, M^4_{y1}$  пропелерів підсумовуються відносно центра мас (ЦМ). Оскільки пропелери  $M^2_{y1}, M^4_{y1}$  обертаються проти годинникової стрілки, а моменти  $M^1_{y1}, M^3_{y1}$  – за годинниковою стрілкою, то, відповідно, від моментів  $M^2_{y1}, M^4_{y1}$  будуть відніматися моменти  $M^1_{y1}, M^3_{y1}$ . Сумарний момент  $M_{y1\Sigma}$  буде діяти на орієнтацію центру мас квадрокоптера. Тяги підсумовуються відносно ЦМ, де від тяги двигунів  $F_2, F_4$  віднімаються тяги  $F_1, F_3$ . Сумарна тяга на виході суматора  $F_\Sigma$  буде діяти на ЦМ квадрокоптера. Таким чином, після дії на ЦМ квадрокоптера сумарних тяги  $F_\Sigma$  і моменту  $M_{y1\Sigma}$ , будуть змінюватись його кути відхилення  $\Delta\gamma, \Delta\vartheta, \Delta\psi$ ; кутова швидкість  $\Delta\omega_x, \Delta\omega_y, \Delta\omega_z$ ; координати  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ; лінійна швидкість  $\Delta V_x, \Delta V_y, \Delta V_z$ ; лінійне прискорення  $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$ . Координати та лінійна швидкість вимірюються за допомогою

навігаційної системи визначення місцеположення, кути відхилення та кутова швидкість – за допомогою ДКШ, лінійне прискорення  $\ddot{\alpha}_x, \ddot{\alpha}_y, \ddot{\alpha}_z$  – за допомогою трьохосового акселерометра. Від блоку навігаційної системи визначення місцеположення сигнал про координати  $x, y, z$  та лінійну швидкість  $V_x, V_y, V_z$  йде на систему керування місцеположенням центру мас БПЛА, що визначає проєкції тяг двигунів на вісі  $x_I, y_I, z_I$ . Далі на польотному контролері розраховується сумарна тяга квадрокоптера і за допомогою від'ємного зворотного зв'язку порівнюється з сигналами сумарної тяги  $R_3$ , яка надходить з пульта керування. Сигнали поточної кутової швидкості  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  що виходять з ДКШ, та лінійного прискорення  $\ddot{\alpha}_x, \ddot{\alpha}_y, \ddot{\alpha}_z$ , що виходять з акселерометра, також ідуть на систему керування кутовим положенням ЦМ.

**Система вимірювання висоти польоту БПЛА.** САП квадрокоптера включає в себе спроектовану в цій роботі СВВ його польоту, яка скла-

дається з одного УВ типу НС SR04 і двох цифрових МЕМС-датчиків тиску типу BMP280. На рис. 2 зображено структурну схему САП квадрокоптера, де  $N(X, Y, Z)$  – вектор навігаційних координат місцеположення ЦМ,  $Z$  – вертикальна координата; 1 – блок обчислення середнього значення вихідних сигналів  $H_1$  від БВ1 і  $H_2$  від БВ2; 2 – блок обчислення вектору вертикальної координати  $z(t)$ .

Система автоматичної посадки (САП) працює таким чином: на приймач надходить радіосигнал з пульта керування про здійснення автоматичної посадки квадрокоптера (при  $Z_0 \rightarrow 0$ ).

Висота польоту квадрокоптера вимірюється за допомогою САП підвищеної надійності, в структуру якої додана СВВ, що складається з трьох сенсорів. Надійність і точність САП збільшена шляхом комплексування функціонального і структурного навантаженого резервування, тобто об'єднання в СВВ одного датчика УВ з двома датчиками БВ. УВ вимірює час прохо-

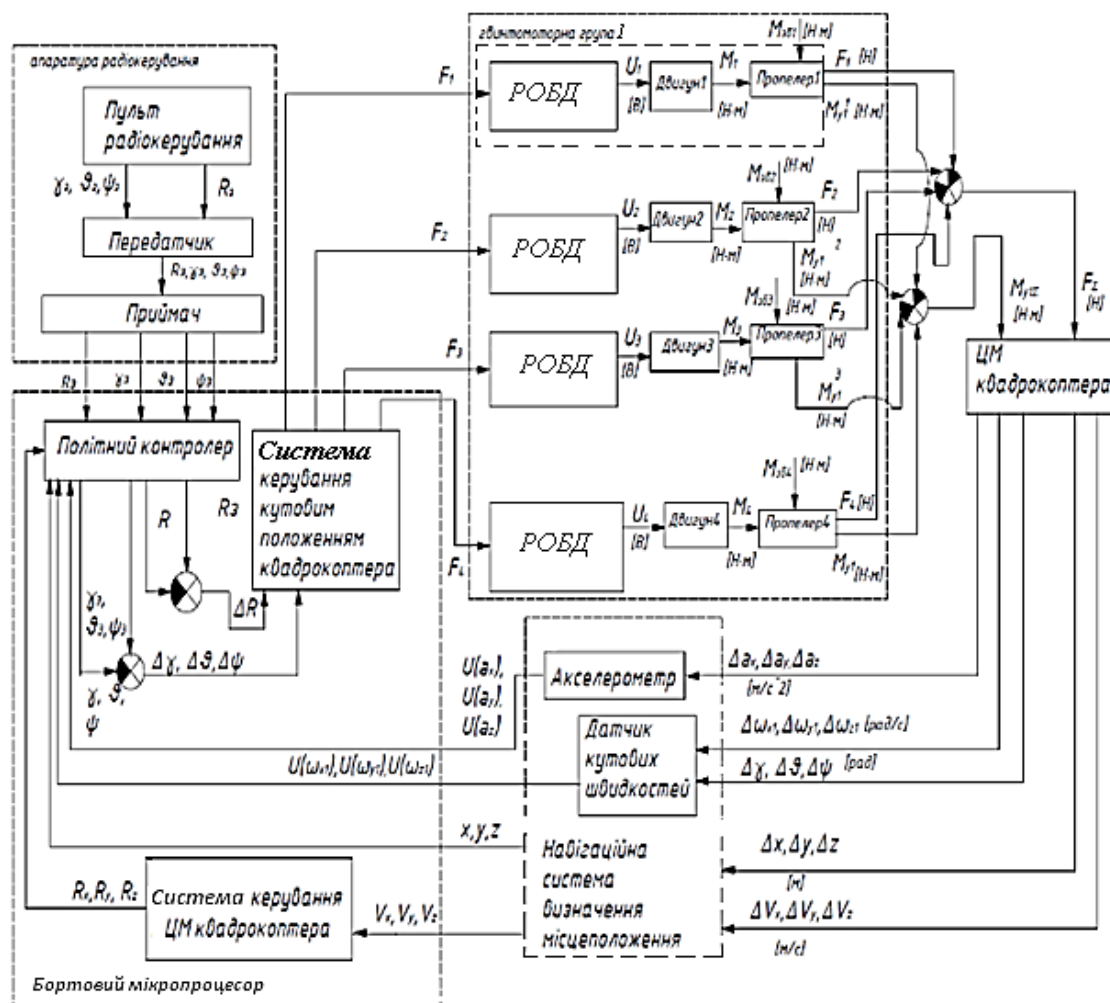


Рис. 1. Структурна схема системи автоматичного керування рухом квадрокоптера

дження радіохвилі від сенсора до поверхні землі ( $T$ ), що пропорційний відстані від ЦМ до поверхні землі ( $L$ ), яка фактично є висотою польоту. На вхід двох БВ подається барометричний тиск ( $P$ ), а на виході маємо барометричну висоту  $H_1$  і  $H_2$ . Далі ці сигнали об'єднуються і комплексуються з вертикальним складником навігаційної координати  $Z$ , а різниця (відхилення)  $\Delta Z$  подається в мікропроцесорний обчислювач польотного контролеру, де розраховуються тяги двигунів для здійснення посадки БПЛА. Крім того, на вхід блоку обчислення 2 подається відхилення лінійного прискорення по вертикальній осі  $\alpha_z$ .

Барометричний висотомір BMP280 складається з п'єзорезистивного датчика тиску (ПДТ) та інтегральної схеми ASIC спеціального призначення змішаного сигналу. ASIC виконує перетворення з аналогового на цифровий сигнал і забез-

печує результати конвертації даних про конкретні компенсації через цифровий інтерфейс.

Тиск навколишнього середовища спричиняє багато короточасних змін, викликаних випадковими збуреннями на датчик. Для придушення цих порушень у вихідних даних, не викликаючи додаткового завантаження інтерфейсу та робочого навантаження на процесор, BMP280 має внутрішній фільтр IIR. Це ефективно зменшує пропускну здатність вихідних сигналів. Коефіцієнт фільтрації коливається від 0 (вимкнено) до 16.

На рис. 3 зображена структурна схема роботи мініатюрного БВ на базі ПДТ. BMP280 вимірює атмосферний тиск  $P$  та температуру  $t$  повітря в поточний момент часу. Далі вони за допомогою ASIC перетворюються з аналогового сигналу на цифровий ( $N_p$ ,  $N_t$ ).

На рис. 3 позначено:  $N_p$  – цифрове значення тиску;  $N_t$  – цифрове значення температури;

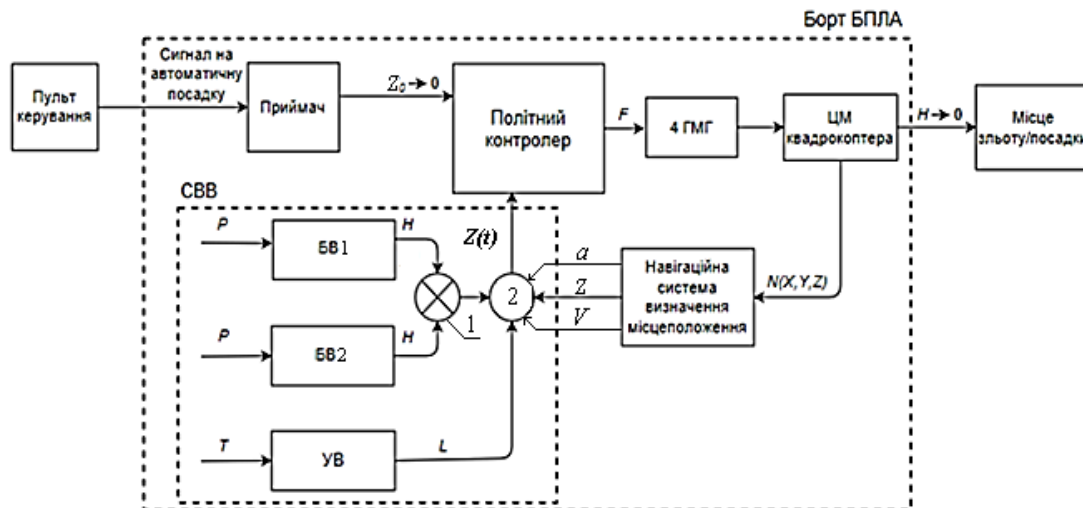


Рис. 2. Структурна схема системи автоматичної посадки з системою вимірювання висоти польоту квадрокоптера

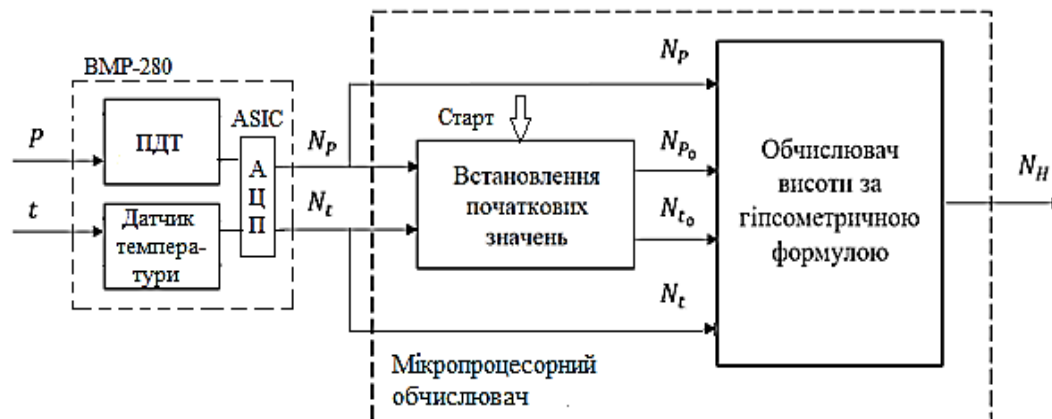


Рис. 3. Структурна схема БВ



$N_{p0}$  – початкове значення тиску;  $N_{t0}$  – початкове значення температури;  $N_H$  – цифрове значення висоти;  $\Delta P_H$  і  $\Delta P_0$  – похибки виміру тиску на висоті  $H$  і на поверхні землі;  $\Delta T_0$  – похибка виміру температури на поверхні землі,  $H = \left(1 - \left(\frac{P_H}{P_0}\right)^{R \cdot t_0}\right) \cdot \left(\frac{T_0}{t_0}\right)$ , де  $R = 29,27$  м/град – газова стала;  $P_H$  – тиск на висоті  $H$ ;  $P_0$  – тиск на поверхні землі;  $t_{tr} = 0,0065$  град/м – градієнт зміни температури з висотою;  $T_0$  – температура на поверхні землі.

Ультразвуковий віддалемір (УВ) типу HC SR04 дозволяє вимірювати відстань до об'єкта в діапазоні від 2 до 250 см, має невеликі габарити і зручний інтерфейс. Він складається з двох мембран, одна з яких генерує звук, а інша – сприймає відображений звук. УВ визначає відстань до об'єкта, вимірюючи час відображення звукової хвилі від об'єкта. Частота звукової хвилі знаходиться в межах частоти ультразвуку, що забезпечує концентрований напрямок звукової хвилі, оскільки звук з високою частотою розсіюється в навколишньому середовищі менше. Під час вимірювання генератор УВ створює електричні коливання, які перетворюються за допомогою п'єзокристалу на ультразвукову хвилю, яка випромінюється в навколишній простір. Долітаючи до перешкоди, ця хвиля відбивається і повертається як відлуння в приймач.

Вимірюючи час між відправленням і прийманням сигналу  $\Delta t$  та знаючи швидкість звукової хвилі  $V$  в середовищі, можна виміряти відстань  $L$  до перешкоди за формулою  $L = \frac{V \Delta t}{2}$ .

Працездатність розробленої СВВ досліджувалась на діючих макетах. На рис. 5 і 6 представлені діючі макети СВВ і БВ.

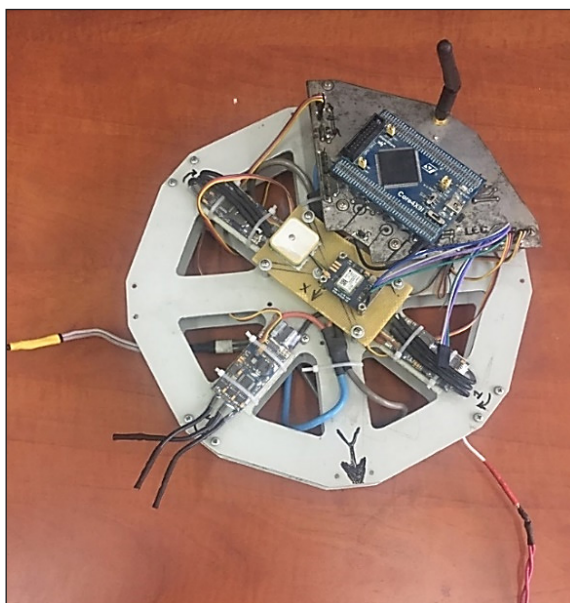


Рис. 4. Діючий макет СВВ

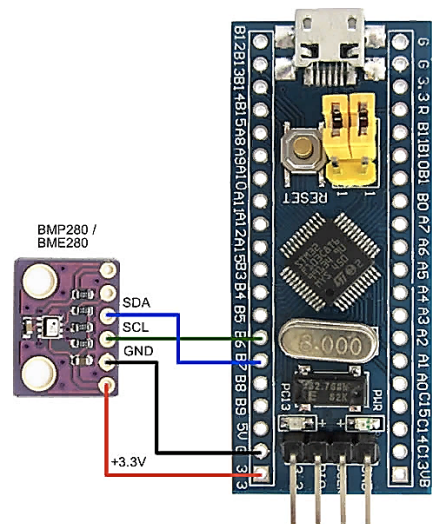


Рис. 5. Діючий макет БВ

**Підвищення надійності СВВ.** Відомо [4, с. 173–174], що для істотного підвищення надійності будь-якої системи, кількість (надлишковість) елементу, який резервується, повинна бути більше трьох. Тому вимірювальна частина запропонованої СВВ складається з трьох датчиків: двох БВ і одного УВ.

Ультразвукові датчики зазвичай виходять з ладу за певних обставин, таких як наявність м'яких або двофазних поверхонь, диму та шумових відбиттів. Цих недоліків позбавлені барометричні вимірювачі висоти, але на їх точність і метрологічну надійність впливають вітрові збурення, що діють на квадрокоптер.

Якщо на борту БпЛА використовувати разом декілька недорогих датчиків, що надають інформацію про висоту, необхідно мати алгоритм, щоб вирішити, який датчик надійно працює, а який відмовив, тобто показання якого датчика можна довіряти, а яким – ні. В статті [2, с. 36–38] представлений такий алгоритм, який базується на методах обробки і оцінки декількох сигналів методами математичної статистики. Задача виявлення відмови під час розходженні показів двох однотипних датчиків більш ніж на порогове значення вирішується процедурою ідентифікації такої відмови методом найменших модулів (МНМ) [8, с.]. Цей метод використовує критерії мінімуму суми модуля похибки, які використовуються в оптимальному фільтрі Калмана.

У роботі [9, с. 45] представлений алгоритм використання узагальненого методу найменших модулів разом із оптимальним алгоритмом фільтрації, під час використання якого досягаються одночасні властивості відмовостійкості та адап-



тивності СВВ. Алгоритм спільного використання МНМ та фільтру Калмана: 1) лінійна екстраполяція вектору стану та розрахунок матриці екстраполяції вектору стану; 2) пошук оптимального розв'язку за МНМ з усіх доступних даних вимірювання та екстраполяція вектору стану; 3) ідентифікація викидів вимірювання та їх ізоляція; 4) фільтрація достовірних вимірювань оптимальним фільтром.

Реалізація таких алгоритмів в СВВ дозволила підвищити надійність САП в 1,5 рази за підвищення точності вимірювання висоти в 1,2 рази.

**Математична модель динамічних процесів в об'єкті дослідження.** Динаміку об'єкта можна описати стохастичним диференціальним рівнянням

$$dx(t) = Ax(t)dt + Bd\omega(t),$$

де  $\omega(t)$  – багатомірний вінеревський випадковий процес;  $x(t)$  – вектор стану системи; матриця  $A$  та  $B$  є константами.

У дискретному вигляді рівняння має такий вигляд:

$$x(t_i) = F(t_{i-1}, t_i)x(t_{i-1}) + n_i,$$

де  $F(0, t) = \exp(At)$  – матрична експонента;  $n_i$  – вектор нормального розподілу випадкових величин, таких що:

$$\text{cov}(n_i, n_i^T) = \int_0^{t_i - t_{i-1}} F(0, t) B B^T F^T(0, t) dt. \quad (1)$$

Усі типи вимірювання є лінійними і у загальному вигляді модель вимірювання можна описати так:

$$z(t_i) = Hx(t_i) + \xi_i,$$

де  $\xi_i$  – вектор незалежних випадкових величин;  $H$  – постійна матриця спостереження. Кожен тип вимірювання є прямим виміром вектору стану:

На випадковий процес другого порядку, який описує рух центра мас квадрокоптера, накладається випадковий процес, що описує заздалегідь невідому різницю між барометричною зміною висоти та зміною висоти за показом акселерометра. Другий випадковий процес є моделлю динаміки висоти над поверхнею, тобто зміна реальної висоти (ультразвукової віддалі).

Оцінка параметрів трьох випадкових процесів, між якими є кореляція та стан яких вимірюний датчиками, в яких похибки вимірювання незалежні один від одного, дає матрицю динаміки системи:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F(0, dt) = \begin{bmatrix} 1 & dt & dt^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & dt & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dt^2/2 & 1 & dt & 0 \\ 0 & 0 & dt & 0 & 1 & 0 \\ 0 & dt & dt^2/2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \sigma_{axel} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{bar} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{uzd} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Розглянемо задачу для двократного резервування. Вектор змін вертикальної координати буде складатися з таких компонентів:

$$z(t) = \begin{bmatrix} \text{Барометрична висота 1} \\ \text{Барометрична висота 2} \\ \text{IBM швидкість} \\ \text{IBM прискорення} \\ \text{Ультразвукова висота} \\ \text{Ультразвукова швидкість} \end{bmatrix} + \xi_i,$$

де 1 та 2 позначені як перше та як друге джерело однотипних вимірювань.

Вектор випадкових величин  $\xi_i$  має діагональну коваріаційну матрицю:

$$R = \text{cov}(\xi_i, \xi_i^T) = \text{diag}(\sigma_{bar1}^2, \sigma_{bar2}^2, \sigma_{speed}^2, \sigma_{axel}^2, \sigma_{uzd}^2, \sigma_{uzd-sp}^2).$$

Матриця спостереження для прийнятих моделей має вигляд:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Розрахунок оцінки стану системи відповідно рекурентному алгоритму Калмана виконується у два етапи: Перший етап прогнозування:

$$\begin{cases} \hat{x}_a(t_i) = F(t_{i-1}, t_i) \hat{x}_a(t_{i-1}) \\ \hat{P}_a(t_i) = F(t_{i-1}, t_i) \hat{P}_a(t_{i-1}) F^T(t_{i-1}, t_i) + Q \end{cases}$$

де матриця  $Q$  розраховується відповідно виразам (1) та (2).

Другий етап – оцінка стану за даними вимірювань:

$$\begin{aligned} \hat{x}(t_i) &= x_a(t_i) + K(z - Hx_a(t_i)); \\ \hat{P}(t_i) &= (I - KH)P_a; \\ K &= P_a H^T (HP_a H^T + R)^{-1} \end{aligned}$$

Отримаємо систему лінійних рівнянь:

$$z = Hx + e,$$

де  $\mathbf{x}$  – вектор параметрів оцінки,  $\mathbf{H}$  – стала матриця,  $\mathbf{z}$  – вимірювання,  $\mathbf{e}$  – похибка вимірювання.

Нехай розмірність вектору  $\mathbf{x}$  менше ніж у вектора  $\mathbf{z}$  та коваріаційна матриця  $\mathbf{z}$  є одиничною  $\text{cov}(\mathbf{e}, \mathbf{e}^T) = \mathbf{I}$ . Для такої системи рівнянь можливо отримати оцінку  $\hat{\mathbf{x}}$  за критерієм мінімуму суми модулів:

$$\begin{aligned} \|\mathbf{e}\|_{L1} &\rightarrow \min; \\ \hat{\mathbf{x}} &= \arg \min_x (\mathbf{L}(\mathbf{x})); \\ \mathbf{L}(\mathbf{x}) &= \sum_{i=0}^N |\mathbf{z}_i - \mathbf{h}_i \mathbf{x}|, \end{aligned}$$

де  $\mathbf{h}_i$  –  $i$ -та вектору стану матриці  $\mathbf{H}$ . Оцінка, отримана відповідно до критерію, є оптимальною лише у разі, коли елементи  $\mathbf{e}$  мають випадковий характер, тобто розподілені за законом Лапласа. Тому необхідно узагальнити метод найменших модулів на випадок, коли  $\mathbf{e}$  має випадкову кореляційну матрицю

$$\text{cov}(\mathbf{e}^T, \mathbf{e}) = \mathbf{P},$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{L}\mathbf{D}^2\mathbf{L}^T$$

де  $\mathbf{L}$  – матриця, стовбці якої складаються з стовбців матриці  $\mathbf{P}$ .

Тоді

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_d &= \mathbf{D}^{-1}\mathbf{L}^T\mathbf{z} = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{L}^T\mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{d}; \\ \mathbf{d} &= \mathbf{D}^{-1}\mathbf{L}^T\mathbf{e}; \\ \text{cov}(\mathbf{d}, \mathbf{d}^T) &= \mathbf{D}^{-1}\mathbf{L}^T\mathbf{P}\mathbf{L}\mathbf{D}^{-1} = \mathbf{D}^{-1}\mathbf{L}^T\mathbf{L}\mathbf{D}^2\mathbf{L}^T\mathbf{L}\mathbf{D}^{-1} = \mathbf{I} \end{aligned} \quad (3)$$

Використовуючи декорелююче перетворення у формі матриці повороту, отримуємо систему рівнянь з незалежними вимірюваннями, коли оптимальне рішення за критерієм суми модулів може бути знайдено відповідно системи рівнянь (3).

**Висновки.** У статті представлена розроблена система вимірювання висоти польоту квадрокоптера підвищеної надійності, що забезпечує безаварійну посадку під час впливу вітрових збурень.

У СВВ реалізований метод підвищення надійності і точності об'єктів шляхом комплексного поєднання функціонального і структурного резервування: СВВ складається з двох БВ, з'єднаних паралельно навантаженим резервуванням (структурне резервування), і одного УВ, що представляє собою функціональний резерв для двох БВ.

Результати аналізу точності і експериментального дослідження макету СВВ показали, що її практичне використання на борту квадрокоптера дозволить підвищити надійність САП в 1,5 рази за підвищення точності вимірювання висоти в 1,2 рази.

#### Список літератури:

1. Beck, Hadrien et Lesueur, Julien et Charland-Arcand, Guillaume et Akhrif, Ouassima et Gagne, Samuel et Gagnon, François et Couillard, Denis. 2016. «Autonomous takeoff and landing of a quadcopter». In International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) (Arlington, VA, USA, June 7–10, 2016), p. 475–484. Piscataway, NJ, USA: IEEE.
2. Нечипоренко О.М., Савлук О.О. Комплексована система вимірювання висоти польоту літального апарату. *Науково-технічний збірник «Механіка гіроскопічних систем»*, випуск 36 (2018). Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. С. 32–39.
3. Жмудь В.А. Ультразвуковой датчик измерения расстояния HC-SR04. Автоматика и программная инженерия. 2017, № 4(22). С. 18–26.
4. Нечипоренко О.М. Основи надійності літальних апаратів. Навчальний посібник з грифом МОН. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 240 с. Бібліогр.: с. 235–239. ISBN 978-966-622-502-6.
5. Nils Gageik, Julian Rothe, Sergio Montenegro. Data fusion principles for height control and autonomous landing of a quadcopter. University of Würzburg, Aerospace Information Technology (Germany), Würzburg, September, 2012. 6.
6. Емельянова О.В., Яцун С.Ф., Попов Н.И. Изучение движения квадрокоптера в вертикальной плоскости. *Актуальные вопросы технических наук (II): материалы междунар. заоч. науч. конф.* (г. Пермь, февраль 2013 г.). Пермь : Меркурий, 2013. С. 66–70. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/73/3483/>.
7. Nils Gageik, Julian Rothe, Sergio Montenegro. Data fusion principles for height control and autonomous landing of a quadcopter. University of Würzburg, Aerospace Information Technology (Germany), Würzburg, September, 2012. 6.
8. Peter J. Huber Robust statistics, Wiley series in probability and mathematical statistics. 2nd edn. Robust statistics. New York : John Wiley and Sons, 2009. 308.
9. Нечипоренко О.М., Мелашенко В.О. Підвищення надійності системи автоматичної посадки квадрокоптера. *Науково-технічний збірник «Механіка гіроскопічних систем»*, випуск 37 (2019). Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. С. 42–50.

**Nechyporenko O.M. HIGHLY RELIABLE MEASUREMENT SYSTEM  
OF FLIGHT ALTITUDE OF A QUADROCOPTER**

*The scientific article presents the analysis and results of the research of the automatic motion control system of the quadcopter; the system of its automatic landing, as well as the developed system for measuring the flight altitude of the quadcopter of high reliability, which ensures trouble-free landing. In the 'I developed system of measurement of flight altitude, the method of increase of reliability and accuracy of technical objects by a complex combination of functional and structural redundancy that will allow to increase reliability and accuracy of system of automatic landing is implemented.*

*The purpose of the research is to ensure automatic accident-free landing of the quadcopter. To achieve this goal, it is proposed to increase the reliability and accuracy of the automatic landing system by using an additional altitude measurement system, which combines functional and structural load redundancy, ie combining one ultrasonic rangefinder with two barometric altimeters. In fact, it is a combination of functional redundancy, is a combination of barometric and ultrasonic altitude measurement devices that have the same functional purpose but use different physical measurement principles, and structural redundancy (combining two sensors of the same type – two identical barometric altimeters). The choice of ultrasonic rangefinder and barometric altimeter for the designed altitude measurement system is based on the fact that these sensors work most reliably at very low altitudes of the quadcopter; especially when it lands.*

*The article presents a mathematical model of dynamic processes of the object of study. The following methods were used in the research: structural and functional redundancy, generalized method of smallest modules and optimal filtering, methods of mathematical statistics.*

**Key words:** *quadcopter, flight altitude, reliability, redundancy, barometric altimeter, ultrasonic rangefinder.*

UDC 629.76.620.17

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/07>

**Chemerys V.T.**

V.I. Vernadsky Taurida National University

### ANALYSIS OF SOME DESIGN SOLUTIONS OF ELECTROMAGNETIC SCREENS FOR COMPENSATION OF THE LEAKAGE FLUX IN THE ROTATING COMPRESSION GENERATOR OF PULSED CURRENT<sup>1</sup>

*The electromechanical generator of pulsed current which operational principle is based on the magnetic flux compression is the specific kind of electrical machine whose design and development needs a modern scientific approach. The high efficiency of generator application is possible at condition that the big swing of internal inductance variation of machine is provided in its design at the rotation of rotor. Mainly it can be reached owing to reduction of minimal inductance of machine in the phase of the magnetic flux compression. The electromagnetic shielding of the flux leakage in the slots of electromechanical pulsed generator with a compression of magnetic field is under consideration in this paper. Two design solutions of shields have been tested in the static experimental model of generator active zone part. The first variant of screen consists of two copper plates with insulation cover which are installed along the inner walls of slot. The second variant of screen consists of two copper plates of the same width as slot has. One of this plates is situated at the bottom of slot and other plate is situated at the neck of slot, and such a pair of plates has a connection between their edges by the copper crosspieces out of the space of slot. The new design of winding keeper is proposed for the increase of the total inductance swing. The group of slots which belong to the each pole division of winding are placed in the conducting block which in turn is places in the wide slot of magnetic core. This solution allows to reduce a magnetoconductivity for the flux directed across the slots. The principle of magnetic shielding operation has been demonstrated with application of numerical simulation of pulsed magnetic field passage across the screen, software COMSOL v. 3.5 has been used for this purpose. Some results of shielding simulation are reported, and problems of development and simulation of the screens for the flux leakage compensation have been discussed.*

**Key words:** compression generator, flux leakage, copper shields, implementation in model, testing of model, problems of numerical simulation.

**Introduction.** The compression generator of pulsed current [1] is under consideration of many authors during a long time as the prospective source of the multiple pulses of high energy suitable for the experimental physical installations and technological applications. In the simplest view such generator which was proposed in [1] has the identical windings distributed in slots of stator and rotor which are connected in series due to the sliding contact realized with the brushes and contact rings. The ratio of maximal and minimal inductances of generator, or the total inductance swing, is the main design and operational parameter of compression generator [2]. Respectively, two phases of generator operation are the most important for analysis: a stage of the field excitation when the inductance of machine is maximal, and a

stage of the field compression when the inductance of machine is minimal. In the normal mode of operation the steel of generator core is unsaturated that is why the maximal inductance can be changed only by the variation of the winding data. The minimal inductance is desirable to be minimal; beside of the winding data it depends on the steel saturation in the stage of compression and on the field distribution in the slots and teeth's zone. The reduction of the minimal inductance of generator means an improvement of the energy and current amplification, increase of the output energy and provides a possibility to match a generator with low-inductance load. One of the methods for the minimal inductance reduction is a using of the electromagnetic shields coupled with the magnetic fluxes of leakage in the phase of the field compression. Among the known propositions there was idea to put the windings of stator and rotor in the conduct-

<sup>1</sup> The author has a pleasant possibility to thank all colleagues and assistants especially engineer O.M. Shatz whose help was so important at the fulfillment of experiments on physical model.

ing tubes (published by P. Vasyukevitch [3]). It was a radical way but difficult for the practical performance in design. In addition it is necessary to remember that the shield must not form the short-connected contour for the main magnetic flux of machine. The success in the using of electromagnetic screens for the reduction of generator inductance in the phase of the field compression is related with the creation of shields coupled only with the flux of leakage but not with the main flux of machine. Some propositions on the creation of such shields have been considered in this paper.

The paper contains some data of testing of the special experimental model which was created for the electromagnetic shields study at alternating current instead of pulsed current and in statics without rotating parts. Some conclusions of this study are used for the following discussion from the point of view of their implementation into the real design of the compression generator.

**Experimental model and its testing.** The linear model of teeth's zone has been manufactured for the experimental checking of electromagnetic screen as the method of the leakage inductance reduction at the phase of the magnetic flux compression. This model can be considered as the piece of the active zone of typical compression generator with identical windings of stator and rotor [1]. The sketch of model is given in the Fig. 1 and general view of model is presented in the Fig. 2 and Fig. 3. It consists of two linear magnetic cores with slots; the usual transformer steel has been used for production of cores. The dimensions of each core in plane are 495 x 160 mm. The teeth's zone occupies a full length of each core and has 18 slots of width 13 mm and height 70 mm. Each core has 4 concentric multi-turn copper wire coils ( $w = 10$ ) mounted with a pole division  $\tau = 208$  mm which covers 8 teeth's steps. The coil of each slot is subdivided on 18 sections ( $2 \times 9$ ), two along the width of slot and 9 along the height of slot. The model in the open state is shown in the Fig. 2 and in the working position in the Fig. 3. The terminals of each section have been led to the commutation panel. The corresponding sections of the upper core as well as of the lower core have been connected in the groups following the number position inside of slot. So the upper core and lower core had 18 coil groups each one, 4 sections in each group. It was possible to connect all groups in parallel or in series, the last was preferable.

The 400 Hz alternator driven from industrial net 50 Hz has been used for the current supply. A direct measurement of current and voltage of each group of coils have been realized for the following inductance

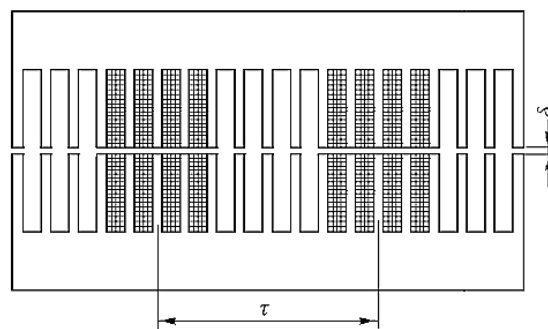


Figure 1. The Sketch of the experimental model of the active zone part

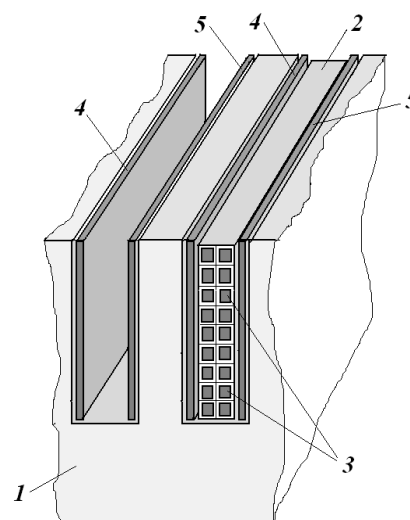


Figure 2. Using of the Shield 1 in the model (1 is the ferromagnetic core, 2 is the winding package, 3 is the sections of winding, 4 is the copper plate at left side of slot, 5 is the copper plate at the right side of slot)

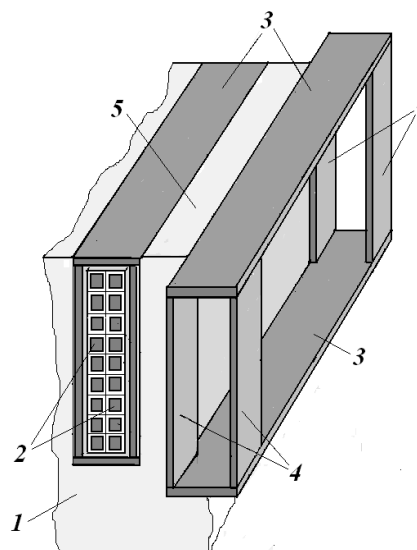


Figure 3. Using of the Shield 2 in the model (1 is the ferromagnetic core, 2 are sections of winding, 3 are the copper plates, 4 are the conducting brattices). The brattices at the left side of pictures are omitted



calculation. Beside of the coils the possibility has been scheduled in the model to install the special electromagnetic shields in the form of the copper plates 4, 5 (Fig. 2) 1.5 mm thickness contiguous to the sides of tooth inside of each slot (Shield 1) or in the form of the conducting frame 3–4 (Fig. 3, Shield 2). In the working position the air gap between cores was  $\delta = 5$  mm. At the coupling connection of the both cores windings it was possible to simulate the excitation mode of the compression generator. The reverse of current in the windings of one core enabled to get a mode similar to the field compression mode in the compression generator. The parallel connection of coil groups was of the most interest because it was very close to simulation of the current distribution in the solid conductor when it would occupy the full cross section of slot.

It was natural that re-distribution of current to the top of the slots took place at the frequency of current 400 Hz in comparison with 50 Hz. This fact jointly with shield presence had a direct influence on the total inductance swing  $k_L = L_{\max}/L_{\min}$ , here the maximal inductance  $L_{\max}$  is defined at the excitation mode and the minimal inductance  $L_{\min}$  is defined at the compression mode. Two different designs of the slot shields have been tested in the model under consideration. The first of them (Shield 1) used the copper plates 4 and 5 mounted along the sides of the slot (Fig. 2). The second of them (Shield 2) presented the copper frame made of two plates 3 (one on the bottom of slot and another on the top of slot, instead of usual gore) connected one with another by the external brattices 4 as it is shown in the Fig. 3. During the experiments the one or another type (Shield 1 or Shield 2) has been installed by similar way into all slots occupied by winding. The data for the building of curves 1, 2 in the Fig. 6 were measured with installed Shield 1 (Fig. 4).

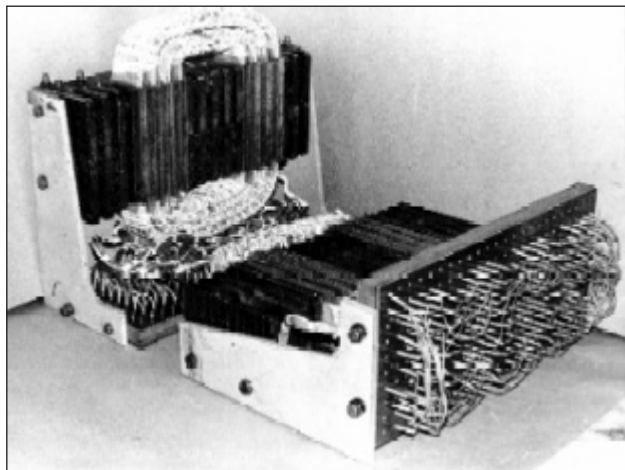


Figure 4. The experimental model in the open state

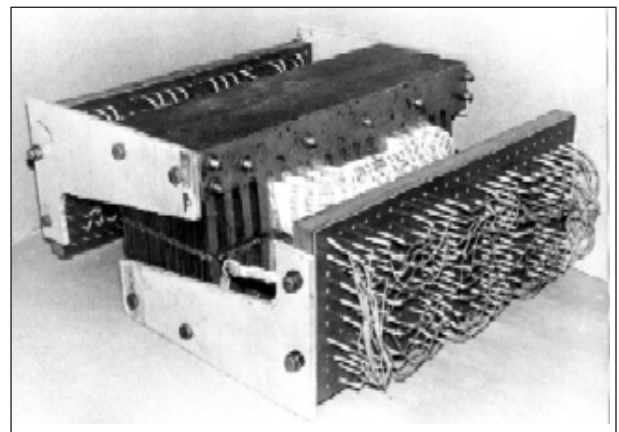


Figure 5. The experimental model in the working position

Table 1  
Measurement of the Winding Parameters at 400 Hz

Measured parameter	Without shielding	Shield 1, Fig. 2	Shield 2, Fig. 3
$L_{\max}$ , mH	74.3	60.7	67.8
$L_{\min}$ , mH	6.75	3.2	4.0
$R_{\max}^{\text{eff}}$ , Ohms	9.26	27.5	10.6
$R_{\min}^{\text{eff}}$ , Ohms	0.94	2.06	2.18
$k_L = L_{\max}/L_{\min}$	11.01	18.97	16.95

At the current frequency 50 Hz the current distribution along the sections at the mode of compression (curve 1 in the Fig. 6) has not a big difference in comparison with distribution in the mode of the field excitation (curve 2 in the Fig. 6), what says about the low efficiency of shields application at low frequency of current. The current in the sections of coils which have the smaller steps of slot deposition along the teeth practically had no difference with respect to the sections of coils which have more steps along the teeth (we imply the step deposition more or less than  $\tau$ ). At the presence of Shield 1 the ratio of measured values of inductance was equal to  $k_L = L_{\max}/L_{\min} = 13.2$  ( $L_{\max} = 78.3$  mH,  $L_{\min} = 5.93$  mH).

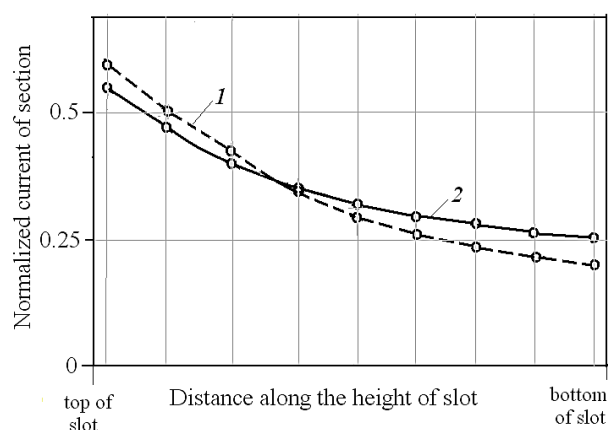
The results of measurement in the mode of the field compression at the current frequency 400 Hz are given in the Table I. The effective resistance of winding  $R^{\text{eff}}$  takes into account not only the own Ohmic resistance of wire but also the insertion resistance stipulated by the energy losses in the steel and in the conductors of shield due to induced current. It is seen in the Table I that the Shield 1 provides the most value of the ratio  $k_L$  but at the same time it gives the

most contribution into the effective resistance of the winding. The Shield 2 which does not cover the side surface of teeth inside of slot provides less value of ratio  $k_L$  but it has also less level of the energy loss caused by induced current.

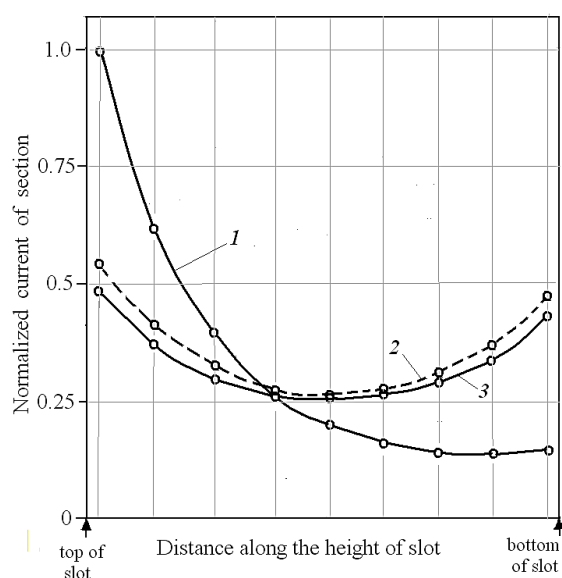
As the frequency of current was increased to 400 Hz, the distribution of current along the sections was changed (Fig. 7). In the mode of the field excitation, i.e. at the coupling connection of the winding in upper core and lower core, a current distribution along the sections of slot windings is shown in the Fig. 7 (curve 1). and outer sections (curve 3 in the Fig. 7). At the reverse of current in one core winding what means a using of the model mode close to the compression mode the great difference is seen with respect to excitation mode.

The curve 1 in the Fig. 6 shows that at absence of Shields' installation the current at frequency 400 Hz in the compression mode is located mainly in the parallel sections of windings which lies near the top of the slot, thus a ratio of current in the top section to the current in the bottom section is 7.7. In spite of this factor the prevailing value of flux across the slot is coupled with sections of winding located close enough to the bottom of slot what is explained as result of steel presence in the bottom of slots. The application of the Shields leads to re-distribution of flux into the area close to the top of slot. Whereas the current reduces in the top sections of slot the flux leakage becomes coupled with the all parallel sections of winding more uniformly. The use of Shield 1 gives an increase of  $k_L$  since 11.01 up to 18.97 (in 1.72 times) due to reduction of  $L_{\min}$  value (data of Table I). The best result has been obtained at the combined screen (Shield 1 + Shield 2), when the measured inductances were:  $L_{\max} = 58.47$  mH,  $L_{\min} = 2.67$  mH, with resulting ratio  $k_L = 21.6$ .

**Discussion of the experimental results.** The current measurement in the sections of winding and calculation of the total inductance swing  $k_L$  in the model displays the influence of the electromagnetic shielding of slots both on the maximal inductance and on the minimal inductance (each of them has a reduction). Making the leakage inductance reduced the shields at the same time insert the additional active resistance into the coils circuit as the result of energy loss due to induced current in the shields. The Shield 1 which covers the sides of slot is effective enough for the leakage flux diminishing but at the same time it inserts more active resistance to the circuit. The Shield 2 in the form of the conducting frame realizes the compromise: it provides a big enough diminishing of the leakage inductance and not so big inserted active resistance. Along with increase of the current



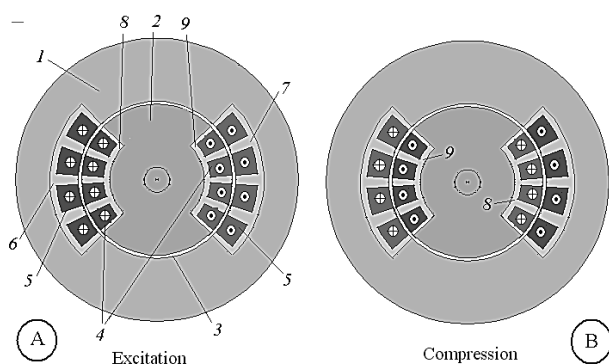
**Figure 6. Distribution of current in the section of winding at the frequency 50 Hz (1 is the mode of compression; 2 is the mode of excitation at coupling connection of both windings). The basic value of current is equal to 1 A**



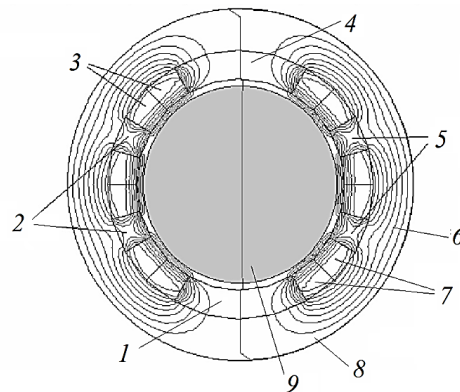
**Figure 7. Distribution of current in the sections of winding at the frequency 400 Hz (1 is the mode of compression; 2 are the inner sections, mode of excitation; 3 are outer sections, mode of excitation). The basic current is equal to 1 A**

frequency the efficiency of electromagnetic shields grows. In the model under consideration the minimal inductance of winding with Shield 1 at 400 Hz less in 1.85 times than at 50 Hz. The best results can be obtained at the combination of the Shield 1 with Shield 2. The full efficiency of the slots shielding in the real compression generator must be evaluated using the join criterion  $\omega L_{\min} / R^{eff}$  where  $\omega$  is the angular frequency of rotor rotation. This criterion is based on the comparison of the characteristic time of energy dissipation with a time of electromagnetic energy generation during a pulse.

**Possible implementation of shields in generator design.** The design of the Shield 1 is close to the proposed earlier in [4–6] in application to the shock generator stator. There was supposed in [4] to put the copper plates into the slit done in the center of each tooth. Such a position of screen reduces the common leakage of all slots but has no influence on the flux leakage of each slot separately. Shield 1 considered above has affect first on the individual flux leakage of the slot as well as on the collective flux. Its specific implementation in the generator design can be looking as the arrangement of winding in the one common wide slot done in the ferromagnetic core with inserted conducting block as the keeper of winding in several separate slots. This block-keeper at the same time is playing role of electromagnetic shield due to strong influence of the conducting material of block on the flux leakage in the mode of the flux compression. The sketch of such generator design is drawn in the Fig. 8. The left part of this figure has the marking of current directions corresponding to the mode of initial excitation of generator. The marking of currents in the right part of Fig. 8 corresponds to the mode of the flux compression after rotor turn on  $180^\circ$ . The picture of the magnetic field lines for this position of rotor presented in the Fig. 9. The purpose of the conducting blocks using is diluting of magnetic flux leakage in the space of slots and displacement of the flux into the air gap between rotor and stator with the corresponding improvement of the total inductance swing. A solution of this problem needs the careful analysis of electromagnetic field in the active zone of generator.



**Figure 8. The cross section of the compression generator at two positions of rotor: A – for the excitation of the initial magnetic field, B – for the stage of the flux compression. Designations: 1 is the stator core, 2 is the rotor core, 3 is the air gap, 4 is the rotor winding, 5 is the stator winding, 6 and 7 are the block-keepers of stator winding, 8 and 9 are the block-keepers of rotor winding**

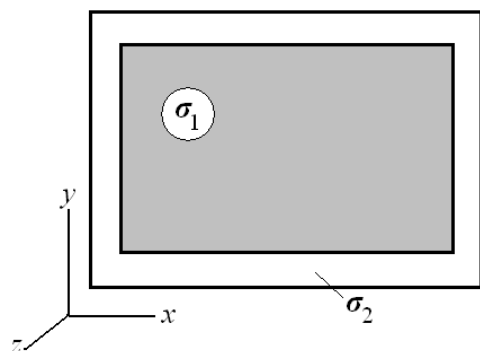


**Figure 9. Cross section of magnetic system of generator with a picture of the field lines in the stage of the flux compression. Designations: 1 and 4 are the big teeth (poles) of stator core; 2 and 5 are the small teeth of stator; 3 and 7 are the winding conductors; 6 is the flux lines in the yoke; 8 is a yoke of stator; 9 is a rotor of generator. Details of rotor design are omitted**

#### Some results of simulation and their discussion.

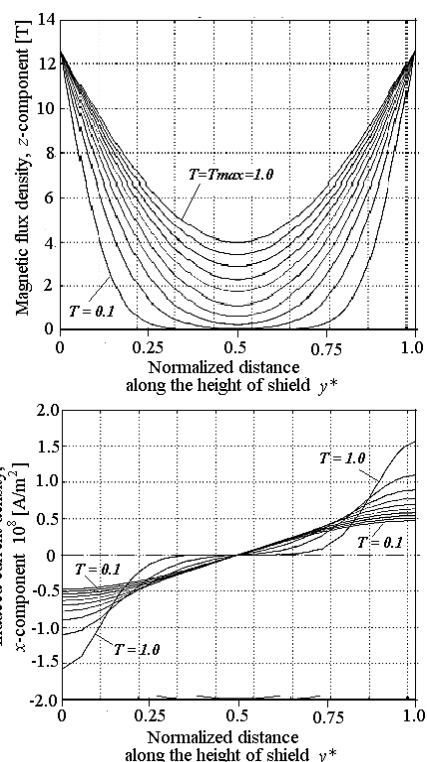
To evaluate the final efficiency of the electromagnetic shielding of any form including the proposed block-keepers the methods of mathematic simulation can be used. The numerical analysis of the transient field in the machine with a shielding of the slot leakage meets the troubles at the attempts to use the standard software for this purpose. The popular programs for the transient electromagnetic field simulation as the Comsol, Quick Field, Elcut don't allow to realize in 2d approximation the condition about the absence of the electromagnetic coupling between the slot shields and the main flux of machine. To realize this condition it is necessary to provide equality to zero for integral of the current density along the cross section of each slot's shield what means in fact a necessity to apply the quasi-3D simulation. The mentioned above programs imply that each induced current flowing perpendicular to the plane of problem is connected with itself at the infinity. It does not correspond to physical situation in the shield. Only the 3D simulation can satisfy the conditions of this problem. The numerical 2D analysis of the transient field with the induced current of shield perpendicular to the plane of task does not allow in any way to specify correctly the magnetic field distribution at Shields installed in the slots of winding. Nevertheless, it is possible to use the 2D simulation for demonstration of the principal peculiarities for Shield 1 and Shield 2. The boundary problems about the pulsed field excitation in the plane copper sheet similar to Shield 1 and in the copper frame of rectangular form likely to Shield 2 have been resolved using the combined model shown in the Fig. 10 which takes into account only the shield at omitted winding conductors.



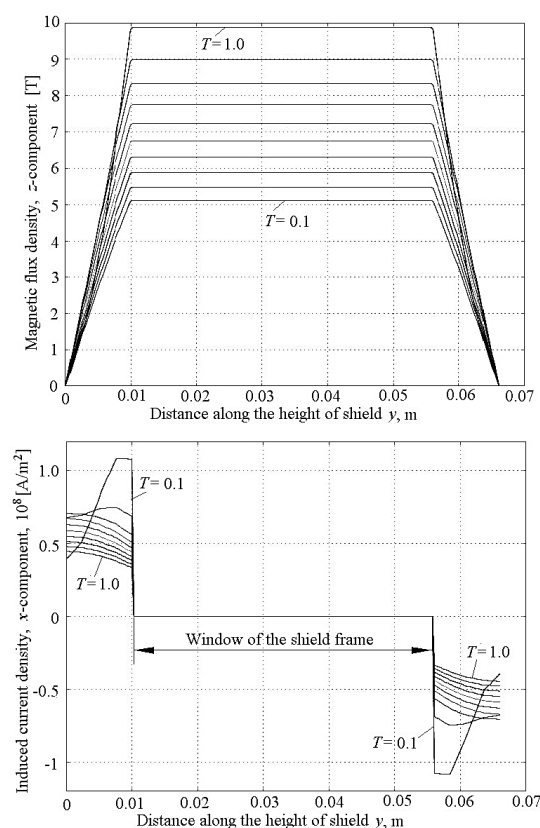


**Figure 10. A simulation model for the study of the shields peculiarities**

The plate of electrical conductivity  $\sigma_1$  in the Fig. 10 serves as a model of Shield 1 with magnetic flux passage along the  $z$ -axis when the conductivity of the external frame  $\sigma_2 = 0$ . The boundary conditions specify the switch in of the magnetic induction  $B_z$  along the border contour of plate in the form of step function of time. The typical curves of the magnetic induction inside of non-dimensional time interval  $T = [0, 1]$  jointly with corresponding curves of induced current density are presented in the Fig. 11 for  $\sigma_2 = 0 = 0.5 \cdot 10^8$  S/m,  $\sigma_1 = 0$ , a time step between curves is equal to  $0.1 T_{max}$ . For the simulation of the pulsed field at the presence only external frame it is necessary to put  $\sigma_2 = 0.5 \cdot 10^8$  S/m,  $\sigma_1 = 0$ . This situation is similar to using of Shield 2. The boundary and initial conditions can be specified here as the fast switch in of magnetic induction  $B_z$  pulse in the windows of frame. The results of simulation are shown in the Fig. 12. The specified values  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.5 \cdot 10^8$  S/m can simulate a joint using of Shield 1 and Shield 2 at boundary condition given as the pulsed induction on the internal border of frame. Analysis of graphs in the Fig. 11, Fig. 12 leads to conclusion about ability of each kind of shield to cause a delay of the flux growth across the plane of shield. The plate similar to Shield 1 is able to have affect on the field distribution along the own surface while the frame similar to Shield 2 cannot change the field distribution in the own window. Evidently the better result for the flux screening can be obtained at the joint using of both kinds of shielding. The presence of bipolar currents in the Fig. 11, Fig. 12 displays the essential and needed feature of both shields which consists of the equality to zero of total current in the cross section of the shield conductor. The residual magnetic flux in the end of the chosen control interval  $t / T_{max}$  in comparison with flux magnitude at  $t = 0$  can be considered as the measure of the pulsed flux compensation by the screen.



**Figure 11. Results of simulation for the flux switch in across the conducting plate likely to Shield 1**



**Figure 12. Results of simulation for the conducting frame likely to Shield 2 at the fast switch in of the flux in the window of frame**

A simulation of the field in the considered combined model of Shields 1, 2 was performed in the software COMSOL v. 3.5. At the attempt to make a simulation the pulsed field in a real generator with a shielding conducting block we meet a limitedness of the 2D software for this problem solution. The reason for this troubles consists of a double polarity of induced currents in the block-keepers which play a role of electromagnetic shield. This fact can be taken into account in the 3D model or in the specialized (quasi-3D) 2D software. The presence of the short-connected contours coupled with the main flux of machine is inadmissible in generator because it is able to prevent the transfer of output energy into the load. That is why the 2D model built on the cross section of all conductors in the slots will not be adequate to the physical situation. A detail study of the problem about the flux leakage compensation in a real design of active zone of the compression generator at presence of electromagnetic shields makes urgent the 3D

or quasi-3D program software. The analysis of field in such approach was realized in [7] using QuickField v. 6.2 (professional) software.

**Conclusions.** The ability of the flux leakage control in the slots by using of the conducting shields has been demonstrated in this work on the base of information received due to the testing of experimental model. The real role and specifics of the electromagnetic shields for a reduction of the minimal inductance of generator has been illustrated with a using of special numerical models. The simulation example in the frame of 2D approximation gives the clear arguments for need of the 3D simulation of magnetic field distribution in the problem of electromagnetic shielding or otherwise for development of specialized quasi-3D models in the frame of the existing 2D simulating programs taking into account the zero total induced current of shield during the transient electromagnetic process. For example, it is possible to realize in QuickField software what was shown in [7].

#### References:

1. Kuchinsky V.G., Larionov B.A. *Elektromashinnyi generator impulsiv* [Electromechanical generator of pulses], USSR Auth. Sert. No. 934888, Cl. H 03 K 3/00. Data of publ. 15.03.1983, Bull. No.30. ( Rus).
2. Druzhynin A.S., Kuchinsky V.G., Larionov B.A. *Kompressionnye generatory* [Compression generators]. In the book: *Fizika i tehnika mozhchnykh impulsnykh system pod red. E.P.Velikhova* [Physics and technology of pulsed power systems, edited by E.P.Velikhov]. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1986. P. 280–298. (Rus).
3. Vasyukevitch P.V. *Koncentraciya magnitnogo potoka v elektromekhanicheskom preobrazovatele* [Concentration of magnetic flux in the electromechanical converter]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR "Energetika i transport"*. 1985. No. 4. P. 36–45 (Rus).
4. Sipailov G.A., Khor'kova V.Z. *Stator udarnogo generatora* [Stator of shock generator]. USSR Auth. Sert. No. 365768, Cl. H 02 K 1/16. Data of Publ. 08.01.1973. (Rus).
5. Baklin V.S. et.al. *O dempfirovanii pazovogo rasseyaniya v obmotke statora udarnogo generatora* [About damping of the slot leakage in the stator winding of shock generator]. *Elektrichestvo*. 1979. No. 8. P.71–73. (Rus).
6. Chemerys V.T. *Field leakage study and possible ways of improving compression generator parameters. 2001 IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference / Digest of technical papers*. Las Vegas, 2001. P. 1516–1519.
7. Chemerys V.T., Borodiy I.A., *Ocenka effektivnosti elektromagnitnykh ekranov dlya kompensatsii potokov pazovogo rasseyaniya v impulsnom elektromashinnom generatore. Visnyk NTU "KPI". Seriya: Elektrichhi mashiny' ta elektromekhanichne peretvorenniya energiyi*. 2020. No. 3. P. 71–77. (Rus). doi: 10.20998/2409-9295.2020.3.12.

#### Чемерис В.Т. АНАЛІЗ ДЕЯКИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ ПОТОКУ РОЗСПІВАННЯ В ЕЛЕКТРОМАШИННИХ ГЕНЕРАТОРАХ ІМПУЛЬСНОГО СТРУМУ З КОМПРЕСІЄЮ МАГНІТНОГО ПОТОКУ

*Електромашинний генератор імпульсного струму, принцип дії якого базується на компресії магнітного потоку, – це один з видів спеціальних електричних машин, конструювання й розвиток яких потребує сучасного наукового підходу. Висока ефективність практичного застосування такого генератора можлива за умови, що в його конструкції забезпечений високий перепад внутрішньої індуктивності машини під час обертання ротора. Головним чином цього можна досягнути шляхом зменшення мінімальної індуктивності машини у фазі компресії магнітного потоку. В цій статті розглядається електромагнітне екранування потоків пазового розсіювання в електромашинному генераторі з компресією магнітного потоку. На статичній експериментальній моделі частини активної зони генератора були досліджені два варіанти конструкції екрана. Перший варіант екрана передбачає встановлення мідних пластин, ізольованих тонким шаром діелектрика, вздовж бокових стінок пазів обмотки. Другий*



варіант екрана передбачає встановлення в пазу двох електропровідних пластин шириною, що дорівнює ширині паза. Одна з них розміщується на дні паза, а друга – у відкритті паза, і вони на краях з'єднані між собою з допомогою мідних перемичок, розташованих за межами паза. Для збільшення перепаду індуктивності запропонована нова конструкція кріплення обмоток в пазу. Група пазів кожного полюсного ділення обмотки розташована в пазах, утворених в електропровідному блоці, який своєю чергою розміщений у розширеному пазу магнітопроводу. Це дає змогу значно зменшити магнітну провідність для потоку, орієнтованого поперек пазів. Робота також містить результати математичного моделювання екранів. Розглянуто, з якими труднощами пов'язані розроблення й моделювання екранів для компенсації потоку пазового розсіювання.

**Ключові слова:** компресійний генератор, потік розсіювання, мідні екрани, реалізація на моделі, випробування моделі, проблеми числового моделювання.

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391.8

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/08>

**Михалевський Д.В.**

Вінницький національний технічний університет

**Городецька О.С.**

Вінницький національний технічний університет

### РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ АРХІТЕКТУРНИХ ПЕРЕШКОД НА ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ БЕЗПРОВІДНОГО КАНАЛУ СТАНДАРТУ 802.11

Головною структурною одиницею мереж стандарту 802.11 є безпроводний канал. На його характеристики впливає велика кількість дестабілізуючих факторів. Найбільш вагомими із них можна виділити інтерференційні та шумові завади, архітектурні перешкоди, багатопроменеве поширення хвиль, чутливість приймача та інші. Найбільш достовірним способом оцінювання таких факторів є створення емпіричних моделей, які б дозволили розширити можливості технічної діагностики безпроводних мереж стандарту 802.11 на етапах проектування та під час підключення до мереж нових пристроїв.

У роботі запропоновано емпіричну модель оцінювання впливу архітектурних перешкод на основні параметрів безпроводного каналу стандарту 802.11 на базі енергетичного та інформаційного коефіцієнтів ефективності каналу. Модель є справедливою для коротких каналів із довжиною до 16 м та є незалежною від ефекту багатопроменевого поширення хвиль, що вносять об'єкти у приміщенні. На відміну від наявних досліджень, така модель враховує коефіцієнти затухання та послаблення, що дає можливість враховувати густину, товщину або кількість перешкод, та їх вплив на багатопроменеве поширення хвиль. Але для підвищення достовірності оцінювання із використанням запропонованої моделі необхідно проведення значної кількості емпіричних досліджень та створення бази коефіцієнтів, що є незначним недоліком.

Дослідження отриманої моделі показало, що високий рівень адекватності можна отримати на основі емпіричних досліджень із отриманням еталонних регресійних моделей діагностичних параметрів, які можна отримати для прямої видимості між передавачем та приймачем із виключенням дії дестабілізуючих факторів. Крім того, було встановлено, що застосування тільки коефіцієнта послаблення сигналу під час оцінюванні впливу архітектурних перешкод, може привести до виникнення значної похибки.

Отримана модель може використовуватись як розширення моделі каналу на базі енергетичного та інформаційного коефіцієнтів ефективності для підвищення достовірності оцінювання діагностичних параметрів під час технічної діагностики безпроводних каналів стандарту 802.11.

**Ключові слова:** безпроводний канал, стандарт 802.11, ефективна швидкість передачі інформації, потужність сигналу, архітектурні перешкоди.

**Постановка проблеми.** Як відомо [1], через стрімкий ріст кількості мобільних пристроїв біля 70% трафіку генерується у закритому середовищі будинків, офісів, торгових центрів тощо. Це своєю чергою висуває ряд вимог під час створення достатнього покриття мережі з метою забезпечення високої пропускну здатності для кожного абонентського та службового пристрою. Одним із рішень такої задачі є застосування технології стандарту 802.11, що характеризуються відносною простотою та можливістю створення високо-

продуктивних каналів. Але під час проектування таких мереж виникає ряд проблем, що передусім пов'язані із низьким рівнем сигналу та складними умовами його розповсюдження. Цьому сприяє велика кількість дестабілізуючих факторів, до яких можна віднести інтерференційні та шумові завади, архітектурні перешкоди, багатопроменеве поширення хвиль, чутливість приймача тощо. Такі фактори досить погано піддаються теоретичному узагальненню через велику кількість параметрів, які динамічно змінюються. З погляду технічної

діагностики безпроводних каналів стандарту 802.11 у роботах [2–4] розроблені моделі, де такі дестабілізуючі фактори враховуються в комплексі під час оцінювання ефективної швидкості передачі інформації та потужності сигналу на вході приймача. Але не всі дестабілізуючі фактори можуть бути присутніми в каналі, і багато з них можуть мати випадковий характер та можуть виникати у майбутньому, що потребує наявності механізму прогнозування їх впливу. Це є актуальним під час операцій технічної діагностики на етапах проектування та експлуатації мереж. Достовірність діагностики каналів буде залежати від ступеня адекватності моделей оцінювання діагностичних параметрів каналу та моделей оцінювання впливу дестабілізуючих факторів.

**Постановка завдання.** Одним із вагомих дестабілізуючих факторів, що має значний вплив на енергетичний та інформаційний параметри безпроводного каналу 802.11, є архітектурні перешкоди. Такі перешкоди присутні у всіх приміщеннях, створюють затухання на шляху поширення сигналу та створюють відбиваючі поверхні, де виникає ефект багатопроменевого поширення хвиль. Дослідження впливу таких перешкод на рівень сигналу можна виділити у роботах [1; 5–6]. Тут проводились дослідження коефіцієнту послаблення сигналу для різних матеріалів, в результаті чого встановлено, що найбільше поглинання сигналу мають бетон, метал, кераміка та дерево. Якщо проаналізувати результати у роботах [7–8], то можна дійти висновку, що різного роду перешкоди мають вплив і на коефіцієнт затухання сигналу. Таким чином, вплив архітектурних перешкод буде оцінюватись коефіцієнтами затухання та послаблення сигналу. Тоді для отримання моделі впливу архітектурних перешкод необхідно знайти статистичний зв'язок між діагностичними параметрами та параметрами архітектурної перешкоди.

До головних діагностичних параметрів можна віднести ефективну швидкість передачі інформації  $V_d$  та потужність сигналу на вході приймача  $P_d$ . Тоді, використовуючи енергетичний та інформаційний коефіцієнт ефективності [4] та виконуючи аналіз робіт [7–8], можна запропонувати модель безпроводного каналу стандарту 802.11, яка враховує дію дестабілізуючих факторів на основні параметри. Зтаку модель можна записати так:

$$K_P = \frac{V_d(l)}{P_d(l)} \cdot \prod_{i=1}^k \frac{K_i^V}{K_i^P}, \quad (1)$$

$$K_V = \frac{V_d(l)}{V_{pl}} \cdot \prod_{i=1}^g K_i^V,$$

де  $V_d(l)$  – модель оцінювання ефективної швидкості передачі інформації із урахуванням довжини каналу;  $P_d(l)$  – модель оцінювання потужності сигналу на вході приймача з урахуванням довжини каналу;  $K_i^P$  – коефіцієнт впливу  $k$ -го енергетичного дестабілізуючого фактору на потужність сигналу на вході приймача;  $k$  – кількість енергетичних дестабілізуючих факторів;  $K_i^V$  – коефіцієнт впливу  $g$ -го інформаційного дестабілізуючого фактору на ефективну швидкість передачі інформації;  $g$  – кількість інформаційних дестабілізуючих факторів.

Достовірність оцінювання за такою моделлю залежить від достовірності оцінювання діагностичних параметрів та рівня адекватності коефіцієнтів впливу фізичним процесам у середовищі передачі. Високий рівень адекватності коефіцієнтів впливу можна отримати на основі емпіричних досліджень із отриманням еталонних регресійних моделей діагностичних параметрів, що можна отримати для прямої видимості між передавачем та приймачем із виключенням дії дестабілізуючих факторів [7–8]. Тоді, враховуючи архітектурні перешкоди як дестабілізуючий фактор, що діє на основні параметри безпроводного каналу, вирази коефіцієнтів впливу можна записати так:

$$K_{an}^P = \frac{P_d^{an}(l)}{P_d^e(l)}, \quad K_{an}^V = \frac{V_d^{an}(l)}{V_d^e(l)}, \quad (2)$$

де  $P_d^{an}(l)$  і  $V_d^{an}(l)$  – регресійні моделі оцінки потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації із урахуванням архітектурної перешкоди;  $P_d^e(l)$  і  $V_d^e(l)$  – еталонні регресійні моделі оцінки потужності сигналу на вході приймача та ефективної швидкості передачі інформації без перешкод.

Найчастіше, архітектурні перешкоди створюються перекриттям між поверхами та стінами приміщень з урахуванням вікон та дверей. Додатковими перешкодами можуть бути наявність різного роду об'єктів у приміщенні, що створюють додаткові відбиваючі поверхні. Кожна архітектурна перешкода характеризується густиною матеріалу, що в найбільш поширених випадках є деревиною, цеглою та бетонними конструкціями (із наявністю металу). Відповідно, товщина таких перешкод та їх кількість, що можуть знаходитись між ТД та абонентським приймачем, будуть впливати на ефективність безпроводного каналу. Тому, враховуючи аналіз наявних досліджень та особливості поширення сигналу за наявності архітектурної перешкоди, знаходження моделі коефіцієнтів впливу із виразу (2) є основним завданням для підвищення достовірності та розширення можли-

востей технічної діагностики безпроводних каналів стандарту 802.11.

**Метою статті** є знаходження моделі оцінювання коефіцієнтів впливу архітектурних перешкод на основні діагностичні параметри безпроводного каналу стандарту 802.11 на базі емпіричних досліджень.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Емпіричні дослідження проводились на базі безпроводної мережі, яку було створено на основі точки доступу (ТД) та абонентського пристрою (АП), що підтримують стандарти 802.11n та 802.11ac. Схему мережі наведено на рис. 1.

Дослідження виконувались у приміщенні, де довжина каналу  $l$  між передавачем та приймачем могла досягати 16 метрів. Між ТД та АП можна вносити дві архітектурні перешкоди на відстані 3 м та 6 м від ТД. Використовувались два найбільш поширені типи перешкод: дерево як перший тип та цегла як другий.

Для систематизації отриманих результатів виконувалось усереднення результатів та введено такі види позначень досліджуваних випадків для графіків: 1 – пряма видимість між передавачем та приймачем без перешкод; 2 – в середовищі передачі є перешкода першого типу; 3 – в середовищі передачі є дві перешкоди першого типу; 4 – в середовищі передачі є одна перешкода другого типу; 5 – в середовищі передачі є дві перешкоди другого типу.

Для мінімізації впливу інших дестабілізуючих факторів у приміщенні були відсутні шумові та інтерференційні завади.

Розробка емпіричної моделі впливу архітектурних перешкод

Вплив архітектурної перешкоди можна розділити на два складники: поглинання енергії сигналу та коефіцієнт відбиття сигналу від поверхні перешкоди. Рівень цих складників залежить від густини матеріалу та його товщини або кількості перешкод у каналі. Тому є доцільним провести дослідження для двох параметрів  $P_d$  та  $V_d$  окремо.

Спершу визначимо моделі регресії діагностичних параметрів із експериментальних даних. Розглянемо отримані результати для найбільш поширених стандартів 802.11n (із смугами каналу 20 МГц і 40 МГц, частотного діапазону 2,4 ГГц) та 802.11ac (із смугами 40 МГц та 80 МГц), обмежуючись короткими каналами до 16 м. Враховуючи [2–3], результати досліджень потужності сигналу на вході приймача можна представити як на рис. 2.

Якщо брати до уваги приміщення як умову для функціонування мережі, то еталонна модель буде включати дію фактору багатопроменевого поширення хвиль, що показує наявність максимумів та мінімумів на характеристиках, які можна враховувати інтервалом флуктуацій [7–8]. Відхилення максимумів та мінімумів для прямої видимості є мінімальним на відміну від випадків із внесеними перешкодами. Внесення архітектурних

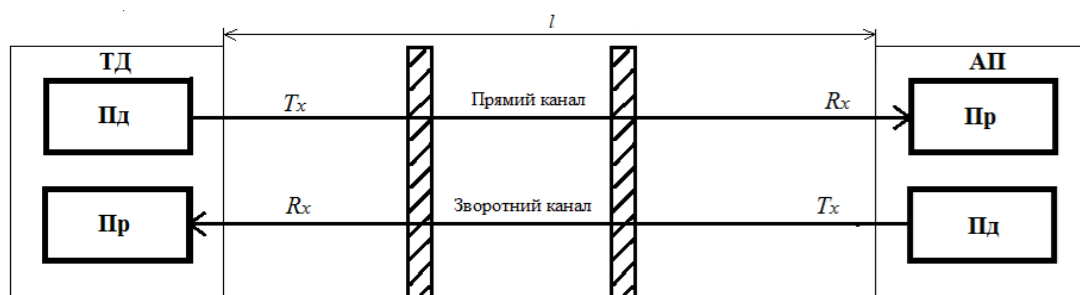


Рис. 1. Структура мережі для дослідження параметрів каналу

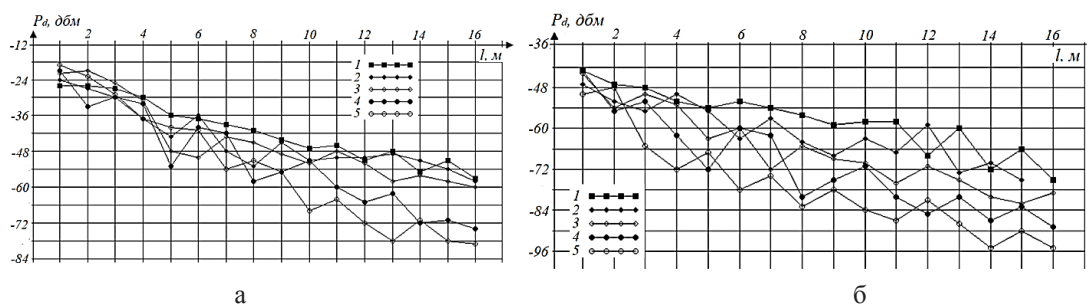


Рис. 2. Залежність потужності сигналу від довжини каналу для: а – частотного діапазону 2,4 ГГц; б – для частотного діапазону 5 ГГц

перешкод додає відбиваючі поверхні, збільшуючи фактор впливу багатопроменевого поширення, та вносить додатковий коефіцієнт згасання. Але, використовуючи усереднення та можливість застосування інтервалу флуктуацій у загальній моделі каналу стандарту 802.11 [2–4; 7–8], можна вважати, що під час оцінювання впливу перешкод флуктуації взаємокомпенсуються.

Якщо застосувати регресійний аналіз до отриманих результатів, то можна отримати квадратичну або, у разі значних згасань, логарифмічну модель, що є справедливим під час оцінювання параметрів окремого каналу, але без урахування положення перешкоди. В цьому разі нас цікавить модель, що повинна враховувати коефіцієнт згасання та коефіцієнт послаблення саме архітектурної перешкоди. Тому, враховуючи короткий канал, застосуємо лінійну регресію для всіх випадків результатів вимірювання після перешкоди. Тоді модель згасання сигналу, що створює архітектурна перешкода, запишеться так:

Таблиця 1

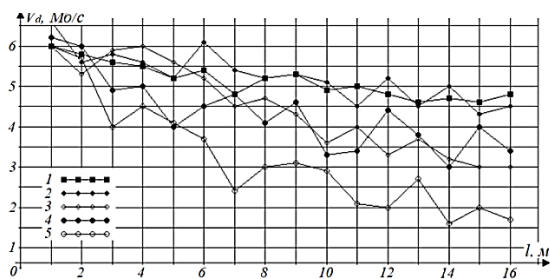
Коефіцієнти лінійної регресії  $P_d(l)$ 

Коеф.	2,4 ГГц					5 ГГц				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$a$	-2	-2,1	-2,2	-2,5	-2,8	-1,6	-1,7	-1,9	-2,1	-2,4
$P_0$	-24	-27	-28	-32	-36	-44	-46	-50	-54	-58

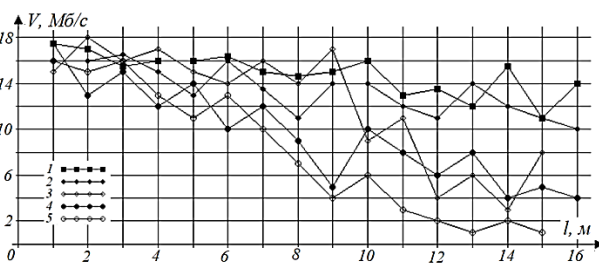
Таблиця 2

Коефіцієнти лінійної регресії для  $V_d(l)$ 

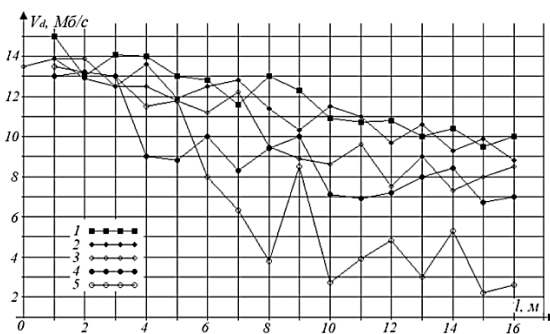
Коеф.	802.11n 20 МГц					802.11n 40 МГц				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$b$	-0,08	-0,09	-0,12	-0,09	-0,12	-0,32	-0,32	-0,35	-0,32	-0,35
$V_0$	6	6	5	4,8	3,8	14,8	14,3	13	11,5	8,5
Коеф.	802.11ac 40 МГц					802.11ac 80 МГц				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$b$	-0,3	-0,35	-0,4	-0,42	-0,5	-0,45	-0,46	-0,5	-0,46	-0,7
$V_0$	17,2	16,5	12	12	9	25	25	21	18	16



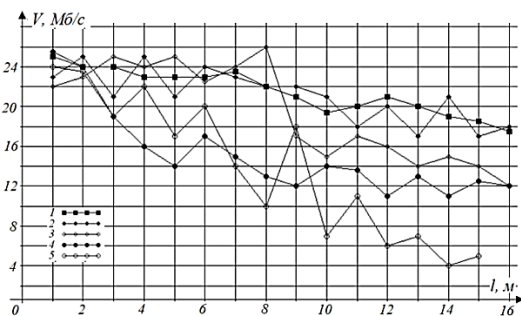
а



б



в



г

Рис. 3. Залежність ефективної швидкості передачі інформації від довжини каналу для:  
а – стандарту 802.11n 20 МГц; б – стандарту 802.11ac 40 МГц;  
в – стандарту 802.11n 40 МГц; г – стандарту 802.11ac 80 МГц



$$P_d(l) = al + P_0, \quad (3)$$

де  $a$  – коефіцієнт затухання сигналу;  $P_0$  – початковий рівень, що для моделей регресії після перешкод є коефіцієнтом послаблення сигналу перешкодою.

Урахування частотного діапазону та типу архітектурних перешкод можна визначити на основі коефіцієнтів виразу (3). Наближені значення коефіцієнтів наведено у таблиці 1.

Як видно із отриманих результатів, матеріал та товщина перешкоди впливає як на затухання сигналу, так і на його послаблення безпосередньо після перешкоди.

Аналогічно розглянемо отримані результати досліджень для ефективної швидкості передачі інформації, які наведено на рис. 3.

Аналогічно до параметра  $P_d$ , модель регресії для ефективної швидкості передачі інформації можна записати так:

$$V_d(l) = bl + V_0, \quad (4)$$

де  $b$  – коефіцієнт затухання для параметра  $V_d$ ;  $V_0$  – початковий рівень або коефіцієнт послаблення  $V_d$ .

Наближені значення коефіцієнтів виразу (4) для безпровідних каналів стандартів, що досліджуються, наведено у таблиці 2.

Припускаючи, що випадок 1 є результатом отримання еталонних моделей  $P_d^e(l)$  і  $V_d^e(l)$ , та підставляючи вирази (3) та (4) у (2) й урахуовуючи коефіцієнти лінійної регресії у таблиці 1 та таблиці 2, отримаємо загальну емпіричну модель

оцінювання впливу архітектурних завад, які можна записати так:

$$K_{an}^P = \begin{cases} \frac{a_n l - P_0^n}{-2l - 24}, & K_{an}^V = \begin{cases} \frac{b_n l - V_0^n}{-0,08l + 6}, & \text{для } 802.11n \text{ } 20\text{МГц}; \\ \frac{b_n l - V_0^n}{-0,32l + 4,8}, & \text{для } 802.11n \text{ } 40\text{МГц}; \end{cases} \\ \frac{a_n l - P_0^n}{-1,6l - 44}, & K_{an}^V = \begin{cases} \frac{b_n l - V_0^n}{-0,3l + 17,2}, & \text{для } 802.11ac \text{ } 40\text{МГц}; \\ \frac{b_n l - V_0^n}{-0,45l + 25}, & \text{для } 802.11ac \text{ } 80\text{МГц}; \end{cases} \end{cases}$$

де  $n$  – номер випадку для оцінювання архітектурних перешкод.

Розроблена модель дає можливість оцінювати вплив архітектурних перешкод на основні параметри каналу стандарту 802.11 або на показники ефективності, застосовуючи модель (1). Модель є справедливою для коротких каналів із довжиною до 16 м та є незалежною від ефекту багатопроменевого поширення хвиль, що вносять об'єкти у приміщенні. На відміну від наявних досліджень, така модель враховує коефіцієнти затухання та послаблення, що дає можливість враховувати густину, товщину або кількість перешкод та їх вплив на багатопроменеве поширення хвиль. Але для підвищення достовірності оцінювання необхідно проведення значної кількості емпіричних досліджень та створення бази коефіцієнтів, що є недоліком.

Як приклад можна навести моделювання для стандарту 802.11n 40 МГц. Результати моделювання коефіцієнтів впливу наведено на рис. 4.

Як видно із результатів моделювання на рис. 4, енергетичний коефіцієнт впливу архітектур-

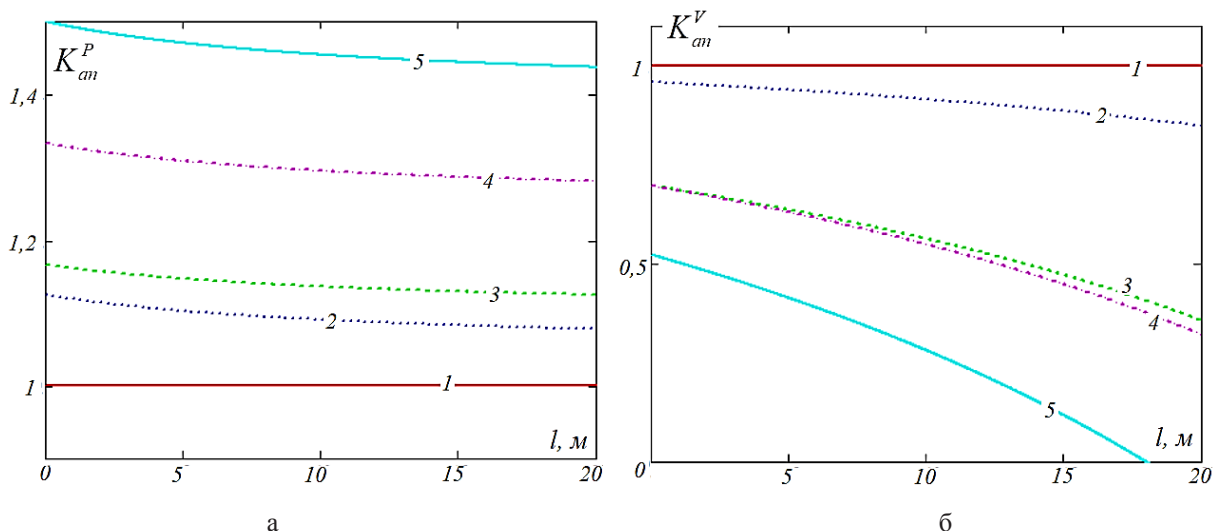


Рис. 4. Залежність коефіцієнтів впливу архітектурних перешкод від довжини каналу: а – енергетичного; б – інформаційного

них перешкод на параметр  $P_d$  характеризується низьким коефіцієнтом затухання та здебільшого може оцінюватись як коефіцієнт послаблення. Інформаційний коефіцієнт впливу має значну залежність від коефіцієнта затухання, що пояснюється значним збільшенням кількості помилок у кадрах та кількістю циклів повторної передачі після перешкоди.

**Висновки.** В роботі запропоновано модель для оцінювання впливу архітектурних перешкод на основні діагностичні параметри безпроводного

каналу стандарту 802.11 на базі емпіричних досліджень, яка може використовуватись для операцій технічної діагностики на етапах проектування та експлуатації мереж. Отримана модель ураховує коефіцієнти затухання та послаблення основних діагностичних параметрів. Крім того, було встановлено, що застосування тільки коефіцієнта послаблення сигналу під час оцінювання впливу архітектурних перешкод може привести до виникнення значної похибки.

#### Список літератури:

1. Hesham A. E. F. S., Lamiaa F. I., Zaki F., Ghadah A. A. Using Clustering Techniques to Plan Indoor Femtocells Layout in the Presence of Obstacles. World Symposium on Computer Applications & Research (WSCAR' 2017), At Istanbul, Turkey, pp. 1–6. 2017.
2. D. Mykhalevskiy, N. Vasylykivskiy, O. Horodetska. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 4/9 (88), pp. 38–43. 2017. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.
3. D. Mykhalevskiy. Construction of mathematical models for the estimation of signal strength at the input to the 802.11 standard receiver in a 5 GHz band. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 6/9 (96), pp. 16–21. 2018. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983.
4. Mykhalevskiy, D. V., Kychak V. M. Development of information models for increasing the efficiency of evaluating wireless channel parameters of 802.11 standard. *Latvian journal of physics and technical sciences*, № 2, pp. 41–51. 2019. DOI: 10.2478/lpts-2019-0009.
5. Suherman N.M., Romulo S.S., Prayitno H. Wifi-friendly building, enabling wifi signal indoor: an initial study. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. V. 126, pp. 1–5. 2018. doi:10.1088/1755-1315/126/1/012022.
6. Adeniran A.O., Ajao S.O., Obot S.E. Experimental Determination of Wireless Attenuation Loss of Some Nigerian Roofing and Ceiling Materials. *Innovation: International Journal of Applied*, V. 4, I. 1, pp. 32–38. 2016. DOI: 10.22214/ijraset.2019.4478.
7. Mykhalevskiy D.V. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*, № 1, pp. 41–51. 2019. DOI: 10.2478/lpts-2019-0004.
8. Mykhalevskiy D.V., Horodetska O.S. Investigation of wireless channels according to the standard 802.11 in the frequency range of 5 GHz for two subscribers. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERD)*, № 42(2), pp. 50–57. 2019. Doi: 10.26480/jmerd.02.2019.50.57.

#### **Mykhalevskiy D.V., Horodetska O.S. DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ASSESSING THE IMPACT OF ARCHITECTURAL OBSTACLES ON THE BASIC PARAMETERS OF THE WIRELESS CHANNEL OF 802.11 STANDARD**

*The main structural unit of 802.11 networks is the wireless channel. Its characteristics are influenced by a large number of destabilizing factors. The most important of them are interference and noise, architectural noise, multi-beam propagation, receiver sensitivity and more. The most reliable way to assess such factors is to create empirical models that would expand the possibilities of technical diagnostics of 802.11 wireless networks at the design stages and during the connection to the networks of new devices.*

*The paper proposes an empirical model for estimating the impact of architectural obstacles on the main parameters of the 802.11 wireless channel on the basis of energy and information efficiency of the channel. The model is valid for short channels up to 16 m long and is independent of the effect of multi-beam propagation of waves that bring objects into the room. In contrast to existing research, this model takes into account the attenuation and attenuation coefficients, which makes it possible to take into account the density, thickness or number of interferences, and their impact on the multipath propagation of waves. But to increase the reliability of the assessment using the proposed model, it is necessary to conduct a significant amount of empirical research and create a base of coefficients, which is a minor drawback.*

*The study of the obtained model showed that a high level of adequacy can be obtained on the basis of empirical studies with reference regression models of diagnostic parameters that can be obtained for direct visibility between transmitter and receiver with the exception of destabilizing factors. In addition, it was found that the use of only the signal attenuation factor in assessing the impact of architectural interference, can lead to significant errors.*

*The obtained model can be used as an extension of the channel model based on energy and information efficiency coefficients to increase the reliability of the assessment of diagnostic parameters during the technical diagnostics of 802.11 wireless channels.*

**Key words:** wireless channel, 802.11 standard, effective data rate, signal strength, architectural obstacles.

**Новіков В.І.**

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

**Лисенко О.І.**

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

**Валуйський С.В.**

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

**Гуйда О.Г.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## **МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ МОБІЛЬНИМИ СЕНСОРАМИ Й ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ АЕРОПЛАТФОРМАМИ**

*Стаття присвячена викладенню математичних моделей методів та алгоритмів підвищення пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами з одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності мобільних сенсорів в умовах їх швидкого та непередбачуваного переміщення. Проаналізовано принципи функціонування та методи підвищення пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами. Удосконалено математичну модель оцінки зв'язності вузлів безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами, що дозволить визначати не тільки наявність зв'язності, а й прогнозувати її тривалість в умовах швидкої та непередбачуваної зміни положення мобільних сенсорів. Досліджено математичні моделі оцінки показників функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами, а саме пропускну здатність та середню затримку передачі між заданою парою відправник-адресат. Удосконалено алгоритм пошуку квазі-оптимального положення телекомунікаційних аероплатформ, що дозволить в процесі поточного функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами знаходити раціональні рішення задачі реконфігурації топології телекомунікаційних аероплатформ під час зміни умов їх функціонування (відмови телекомунікаційних аероплатформ та мобільних сенсорів, зовнішні збурення, непередбачувані переміщення мобільних сенсорів). Розроблено метод підвищення пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ, що дозволить підвищити якість інформаційного забезпечення моніторингової системи зони стихійного лиха.*

**Ключові слова:** безпроводові сенсорні мережі, мобільні сенсори, телекомунікаційні аероплатформи, безпілотні літальні апарати, математичні методи та моделі.

**Постановка проблеми.** Топологія таких мобільних радіомереж носить динамічний характер та постійно розвивається, а отже, потребує ефективної системи управління (СУ), що могла б швидко реагувати на структурні та функціональні зміни, забезпечуючи ті чи інші цілі управління [1–7]. Такими цілями управління можуть бути

забезпечення зв'язності (структурної надійності), якості маршрутів передачі даних між абонентами (QoS), підвищення пропускної здатності мережі та ін. Управляючими параметрами у даному випадку можуть виступати потужність передавачів, спрямованість ДН наземних і бортових антен, навантаження, взаємне положення вузлів та ін. Недостатньо

розв'язаною на сьогодні є задача оптимального оперативного розміщення множини телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) для підвищення пропускної здатності мережі із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності мобільних сенсорів. Запропоновані на сьогодні методи, що закладаються в СУ топологією (місцеположенням) ТАП, вирішують лише часткові задачі забезпечення геометричної зв'язності роз'єднаних компонентів мережі, не враховуючи обмеження ємності каналних ресурсів, розподілу навантаження та обслуговування пакетів в вузлах мережі. Також більшість методів вирішують лише статичні задачі, не враховуючи характер мобільності сенсорів та маневреність ТАП, а отже підлягають вдосконаленню. Наявні методи планування наземних радіомереж також не ефективні, оскільки мають велику складність та час обчислення, що не дозволяє ТАП відпрацьовувати отримані рішення в режимі реального часу.

Отже, виникає **актуальна наукова задача** – розробка математичних моделей, методів і алгоритмів оптимізації показників функціонування безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами.

**Постановка завдання.** Метою статті є розвиток математичних моделей, методів і алгоритмів оптимізації показників функціонування ad-hoc мереж у задачах підвищення пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами із одночасним забезпеченням структурно-функціональної зв'язності мобільних сенсорів в умовах їх швидкого та непередбачуваного переміщення.

**Виклад основного матеріалу.** Для постановки загальної математичної задачі дослідження розглянемо функціональну модель БСМ із МС та ТАП.

1-й рівень БСМ із МС та ТАП складає мережа МС, що можуть довільним чином переміщуватися в деякому районі  $r$ . За наявності прямої видимості МС зв'язуються між собою через спільний ширококомовний канал на частоті  $f_1$ , а за відсутності – застосовують принцип комутації (маршрутизації) пакетів через проміжні вузли. Таким чином, абонентські термінали представляють собою багатофункціональні пристрої, що поєднують у собі прийомопередавач, модем, кодек, маршрутизатор та запам'ятовуючий пристрій, працюючи в одночастотному напівдуплексному режимі за принципом «store-and-forward» («прийняв – запам'ятав – передав»). Для ретрансляції повідомлень через ТАП кожен МС має також другий комплект радіо-

обладнання та пам'яті, працюючи у дуплексному двох частотному режимі на частотах  $f_2, f_3$ .

2-й рівень БСМ із МС та ТАП складає мережа телекомунікаційних аероплатформ, що баражують на висоті  $h$  по колу мінімального радіусу навколо проекції точки свого оптимального розміщення  $(x_{0k}, y_{0k})$ ,  $k = \overline{1, K}$ , де  $K$  – кількість ТАП в мережі, утворюючи стільники радіусом  $R$ . МС, що знаходяться в зоні радіо покриття ТАП можуть ретранслювати пакети як усередині стільника, так і в інших стільниках, скорочуючи таким чином кількість ретрансляцій в довгих маршрутах. Тобто бортова апаратура ТАП також представляє собою складний багатофункціональний пристрій з окремими інтерфейсами (для зв'язку з МС та між собою), що дозволяє виконувати маршрутизацію пакетів по їх адресній інформації, ретранслюючи їх в середині стільника або за його межі. Між стільникові зв'єднання (ТАП-ТАП) працюють у дуплексному режимі із частотним ущільненням, використовуючи набір несучих частот, розподілених за стільниковим принципом, з окремим демо-дулятором на кожній. За допомогою єдиного передавача пакети направляються сусіднім ТАП згідно з наявними запитами в режимі розділення в часі. Вважається, що на борту кожної ТАП є інформація про його місцеположення та розподіл частот по стільникам, що дозволяє при зміні його положення визначити, яку з них слід використовувати в даний момент.

Таким чином, можливі такі варіанти маршрутів передачі даних між МС (наприклад, між МС1 та МС10), що позначені суцільними потовщеними стрілками на рис.6:

- 1) через мережу МС (МС1–МС2–...–МС10);
- 2) через мережу ТАП (МС1–ТАП1–ТАП3–МС10);
- 3) змішаним шляхом (МС1–ТАП1–МС6–...–МС10).

До маршрутів, між заданою парою відправник  $a$  – адресат  $b$ , висуваються наступні *вимоги* спільно:

- 1)  $s_{mab}$  – пропускної здатності (ПЗ) маршруту  $m_{ab} : s_{mab} \geq s^0, a, b = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}$ , де  $N$  – кількість МС в мережі,  $M$  – кількість маршрутів в мережі,  $s^0$  – мінімальний допустимий рівень ПЗ маршруту;

- 2)  $t_{zab}$  – затримки передачі (або кількості ретрансляцій) в маршруті:  $t_{zab} \leq t_z^0 (l(m_{ab}) \leq l^0)$ ;

- 3)  $d_{ij}(D_{ik})$  – структурної зв'язності на всіх ділянках маршруту:  $d_{ij} \leq d^0(D_{ik} \leq D^0) \forall ij \parallel ik \in m_{ab}, i, j, a, b = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}$ , де  $d_{ij}$ ,  $d^0$  – дальність(відстань) між МС та відповідне



обмеження зверху, а  $D_{ik}, D^0$  – дальність між МС та ТАП та відповідне обмеження зверху;

4)  $T_{36\ ij}$  – тривалості зв'язності кожної ділянки  $ij$  маршруту:  $T_{36\ ij} \geq T_{36}^0$ , де  $T_{36}^0$  – мінімальний час, протягом якого ТАП може відпрацювати задане розміщення, встановити маршрут та здійснити передачу мінімальної кількості інформації.

Вибір маршруту здійснюється на основі функціонування одного з відомих методів маршрутизації. Для зручності управління топологією (місцеположенням) ТАП краще використовувати таблично-орієнтовані методи (наприклад, OLSR), тоді кожен МС має власну маршрутну таблицю найкоротших шляхів  $\Pi_i$  до усіх інших вузлів мережі.

Для здійснення управління топологією (місцеположенням) ТАП в мережі використовується центр управління (ЦУ), винесений за межі району дислокації МС  $r$ . Використовуючи окремий службовий канал, ЦУ через мережу ТАП може зібрати вихідні дані про початкову топологію мережі в деякий момент часу  $t$ , а саме координати та швидкість переміщення кожного МС  $(x_i, y_i)_t, \vec{v}_i, i = \overline{1, N}$  та попередньо виведених ТАП  $X_{0k} = [x_{0k}, y_{0k}, z_{0k}]$ ,  $\vec{V}_{0k}, k = \overline{1, K}$ , а також дані про

функціонування мережі  $\Pi_i$  (існуючі маршрути та їх якість), та здійснити відповідне управлінське рішення (вивід нової ТАП або переміщення однієї з раніше виведених ТАП в деяке нове положення простору  $X_{0k}$ ), що максимізує пропускну здатність мережі  $S$ . При цьому вважається, що на момент планування мережі ЦУ відома інформація про розподілення трафіку (навантаження)  $\gamma_{ab}$  між кожною парою відправник-адресат  $a-b$ , що задається матрицею тяжіння  $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$ .

Ціллю управління положенням телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) є підвищення пропускну здатності БСМ із МС та ТАП із одночасним забезпеченням структурної зв'язності МС та якості маршрутів передачі даних між ними.

При цьому під пропускну здатністю мережі будемо розуміти максимальне значення трафіку  $\gamma$ , яке мережа може обробити в одиницю часу при незмінній матриці розподілу трафіку  $\Gamma$ .

Підсумовуючи вищесказане, зведемо всі відомості про функціонування та ресурси в єдину таблицю вихідних даних (див. табл. 1).

Використовуючи вище вказані вихідні дані, загальну постановку задачі можна сформулювати таким чином: визначити розміщення

Таблиця 1

ТАП	Час баражування: $T_{6j} \leq 4 \text{ год}, j = \overline{1, K}$ . Висота баражування: $h_j \leq 3000 \text{ м}, j = \overline{1, K}$ . Швидкість переміщення: $V_{0j} = 60 \dots 400 \text{ км/год}, j = \overline{1, K}$ . Потужність передавача: $P_j = \text{const}, j = \overline{1, K}$ .
МС	Кількість абонентів в мережі: $N < 500$ Координати абонентів: $(x_i, y_i), i = \overline{1, N}$ Швидкість переміщення: $v_i = \text{const}, i = \overline{1, N}$ Потужність передавача: $p_i = \text{const}, i = \overline{1, N}$ Розмір району дислокації: $r = 10000 \times 10000 \text{ м}^2$
Частотне розподілення	Канал МС-МС: напівдуплексний одно частотний ( $f_1$ ). Канал МС-ТАП-МС: дуплексний двох частотний ( $f_2, f_3$ ). Канал ТАП-ТАП: Дуплексний багаточастотний. Ширина смуги каналу: $\Delta f_1 = \dots = \Delta f_5 = 20 \text{ МГц}$ . Діапазон частот: $2,4 \text{ ГГц}$ .
МД	Тип МД: випадковий Протоколи МД: МДСЗ (МС-МС), АПР (МС-ТАП-МС), FDMA (ТАП-ТАП).
Маршрутизація	Тип протоколу: таблично-орієнтовний (наприклад, OLSR); Алгоритм побудови маршрутів: Дейкстри.
Трафік	Тип: однорідний (апр., VoIP+дані). Довжина пакету: $L=1024 \text{ біт}$ . Швидкість передачі в каналах: $V=11 \text{ Мбіт/с}$ . Матриця розподілу трафіку $\Gamma = \ \gamma_{ab}(t)\ $
Управління	Тип: змішаний (централізовано-децентралізований)
Допущення	Буфери мають нескінченну довжину черги. Потік надходження пакетів підкоряється розподілу Пуассона.



$X$  групи телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА) для максимізації пропускної здатності мережі  $S$ , тобто

$$S = \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s_{mab}(X) \rightarrow \max_{X \in \Omega}, \quad (1)$$

де  $\Omega$  – ОДЗ, що визначається вимогами до зв'язності та показників функціонування БСМ із МС та ТАП;

$$X = \begin{bmatrix} X_{01} \\ \dots \\ X_{0k} \end{bmatrix}, \text{ де } X_{01} = \begin{bmatrix} x_{01} \\ y_{01} \\ z_{01} \end{bmatrix}, \dots, X_{0k} = \begin{bmatrix} x_{0k} \\ y_{0k} \\ z_{0k} \end{bmatrix}, k = \overline{1, K}.$$

Для розв'язання поставленої задачі необхідно розробити:

1) методику оцінки наявності та тривалості структурної зв'язності вузлів БСМ із МС та ТАП;

2) метод (систему) управління положенням телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА).

#### Методика оцінки зв'язності вузлів БСМ із МС та ТАП

**Крок 1.** Прогнозування середньої тривалості зв'язності  $T_{зв\ ij}$  вузлів БСМ із МС та ТАП на основі моделей переміщення МС, що розглядаються нижче.

**Крок 2.** Перевірка можливості відпрацювання ТАП заданої цілі управління при заданій динаміці топології мережі (тривалості зв'язності), що визначається умовою  $T_{зв\ ij} > T_{зв\ ij}^0$ . Якщо умова виконується, тоді підвищення пропускної здатності за допомогою зміни положення ТАП можливе, крім того, є можливість збільшити множину можливих рішень ( $T_{пош.\ ріш.}$ ) для досягнення більшої точності, інакше застосування методу не можливе.

**Крок 3.** Розрахунок дальності зв'язку від кожного МС до найближчого сусіда та центру зони покриття ТАП.

**Крок 4.** Перевірка умов  $\Omega_1$  для кожного МС та перевірка цілісності мережі. Під цілістістю мережі розуміється наявність лише одної компоненти зв'язності графу мережі. Перевірка цілісності мережі можливо шляхом побудови мінімального кістякового дерева (МКД) графу (наприклад, згідно з алгоритмом Пріма [8]) та перевірка кожного ребра дерева на виконання умови  $\Omega_1$ . Якщо умови  $\Omega_1$  виконуються, то мережа є структурно зв'язаною на момент часу  $t$ , інакше – необхідне певне управлінське рішення (наприклад, вивід (переміщення) ТАП).

Для реалізації методики розроблено наступні математичні моделі.

#### Математична модель оцінки максимальної дальності радіозв'язку

Максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку пари вузлів мережі обмежується, по-перше, енергетикою радіолінії (потужністю передавача, чутливістю приймача, підсиленням антен, втрат у антенно-фідерному тракті, вільному просторі та ін.), за якої відношення сигнал-шум у точці прийому не менше визначеної величини для забезпечення заданої ймовірності пакетної помилки (PER) при заданому вигляді сигнально-кодової конструкції.

По-друге, максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку визначається ефективністю функціонування протоколу множинного доступу (МД) до спільного каналного ресурсу. У випадку збільшення протяжності радіолінії зростає кількість колізій в організації МД, а отже, зменшується пропускна здатність та зростає затримка передачі. Тому максимальна дальність зв'язку може визначатися граничним значенням пропускної здатності каналу  $s^0$  при заданій швидкості передачі  $V$ , розмірі пакету даних  $L$  та інтенсивності трафіку  $G$ .

Ураховуючи вищезазначене, отримаємо аналітичну модель оцінки ймовірності пакетної помилки (PER) для каналів БСМ із МС та ТАП:

$$P_{L\ nm} = 1 - (1 - \sum_{a=1}^{\infty} a_d Q(\sqrt{2 \cdot \frac{P_n C_{nm} F_{nm}}{\sigma_m^2 (\sqrt{|x_0^n - x_0^m|^2 + |y_0^n - y_0^m|^2})^a} \cdot \frac{C}{W} \cdot R_c \cdot d}))^L, \quad n \neq m, n, m = \overline{1, K}, \quad (2)$$

де  $F_{nm}$  – множник послаблення радіолінії між ТАП-вузлами  $n$  та  $m$ .

Використовуючи модуляцію BPSK у поєднанні зі загортковим кодом типу 133<sub>8</sub>, 171<sub>8</sub> зі швидкістю 1/2, можна отримати залежності PER від максимальної дальності зв'язку для каналів МС-МС та каналів МС-ТАП (ТАП-ТАП) при різних значеннях потужності передавача.

Максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку також визначається ефективністю функціонування протоколу МД до спільного каналного ресурсу. Так, при  $s^0=0,5$  максимальна протяжність радіолінії МА-МА  $d^0$  має становити не більше 600м для протоколу МД із сигналом «зайнято» (МДСЗ), МА-ТА  $d^0$  – не більше 3000м для адаптивного протоколу МД із резервуванням (АПР)  $n$  пакетів, а на протяжність радіолінії ТАП-ТАП не має обмежень (окрім енергетики), оскільки протокол МД, що застосовується на ній, не залежить від нормованого часу розповсюдження пакету.

Таким чином, щоб забезпечити задані вимоги до характеристик протоколів МД, потужність передавача слід обирати таким чином, щоб забезпечити необхідний рівень пакетної помилки на відстані, що визначається максимальним часом розповсюдження пакету в мережі. Так, для забезпечення рівня PER  $10^{-3}$  на відстані 600м потужність передачі МС має становити близько 0,8Вт. У свою чергу, для забезпечення того ж рівня PER на відстані 3000м потужність передавачів ТАП має становити близько 8Вт.

Знаючи максимальну протяжність радіолінії МС-ТАП, можна визначити максимальний радіус стільника, створюваного телекомунікаційною аероплатформою. У фіксованому положенні ТАП у просторі його величину визначатиме кут місця абонентського терміналу  $\psi$  та висота баражування ТАП  $h$ . Згідно з рекомендацією F.1569 для мереж на основі NARs мінімальний кут місця становить  $20^\circ$ , а на практиці в межах щільно забудованого міста становить  $60^\circ$ - $90^\circ$  для забезпечення прямої видимості між МС та ТАП. Тоді із тригонометричних розрахунків випливає, що радіус стільника становитиме  $R \approx 1500$  м при висоті ТАП  $2600 \leq h < 3000$  м. Але враховуючи маневрування ТАП по колу мінімального радіусу та неточність його виводу, радіус зони стабільного покриття становитиме  $R \approx 1450$  м.

#### Математична модель розрахунку тривалості зв'язності мобільних сенсорів у БСМ із ТАП

Мобільність сенсорів призводить до того, що вони не можуть постійно знаходитись у зоні радіо видимості один одного та зоні покриття ТАП. Тобто виникає необхідність змодельовати час життя з'єднання *LLT* (*Link life time*), протягом якого МС та ТАП можуть здійснювати інформаційний обмін (побудувати маршрут та передати деяку кількість інформації). Вивчення цього питання започатковано в роботах [9; 10], де запропоновано низку моделей мобільності вузлів для аналізу та моделювання. Однак запропоновані моделі лише частково підходять для моделювання мобільності БСМ із МС та ТАП.

Для моделювання переміщення вузлів було використано такі сценарії мобільності:

1) «однакових напрямків», або «марш» ( $\phi = \text{const}$ ,  $v = \text{const}$ ). Згідно з даним сценарієм усі вузли в межах зони радіо видимості  $R$  рухаються прямолінійно та паралельно один одному в однаковому напрямку з однаковою швидкістю;

2) «випадкових напрямків», або «різnobій» ( $\phi = \text{const}$ ,  $v = \text{const}$ ). Згідно з даним сценарієм усі вузли в межах зони радіо видимості  $R$  рухаються

прямолінійно за різними випадковими напрямками з однаковою швидкістю;

3) «випадкового блукання в полі» ( $\phi = \text{var}$ ,  $L = \text{const}$ ,  $v = \text{const}$ ). Усі вузли в межах зони радіо видимості  $R$  рухаються з однаковою швидкістю по ломаній траєкторії, випадково змінюючи свій напрямок через кожний постійний крок  $l \ll R$ ;

4) «випадкового блукання у місті» ( $\phi = \text{var}(0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ)$ ,  $L = \text{const}$ ,  $v = \text{const}$ ). Усі вузли в межах зони радіо видимості  $R$  рухаються з однаковою швидкістю по перпендикулярних прямих (вулицях) та випадковим чином змінюють свій напрямок на кожному перехресті через кожний постійний крок  $l \ll R$ .

Математичні моделі розрахунку тривалості зв'язності у випадках: прямої радіо видимості між вузлами; ретрансляції через проміжний вузол; ретрансляції через проміжні вузли та ТАП дозволили обґрунтувати необхідність виконання спеціальних дій (заходів):

1. Дроблення повідомлень на пакети та відправка пакетів тільки після підтвердження наявності зв'язності та прогнозу на її підтримку протягом часу пересилки одного пакету. Для гарантії пересилки у вузла-відправника повинна існувати (або передбачатися) можливість «розширення» зони покриття за рахунок збільшення потужності передавача або зміни діаграми направленості антени [11], тобто вузол  $A$  «не відпускає»  $B$  протягом передачі хоча б одного пакету.

2. Забезпечення наявності «резервних маршрутів», які автоматично включаються (м'яка естафетна передача) при перериванні основного.

3. Застосування алгоритмів локального відновлення маршруту на основі розрахунку координат вузлів в локальних координатах, як, наприклад, у [12].

4. Застосування мережі ТАП у якості додаткових повітряних вузлів-ретрансляторів (адаптація архітектури до структури багаторангової мережі).

Для визначення ефективності запропонованих заходів розроблена методика оцінки показників функціонування БСМ із МС та ТАП.

Ця методика дозволяє оцінити відповідність сукупності маршрутів передачі даних  $M = \{m_{ab}\}$ ,  $a, b = \overline{1, N}$  вимогам до параметрів функціонування  $\Omega_2$ .

**Методика оцінки показників функціонування БСМ із МС та ТАП складатиметься із наступних кроків:**

*Крок 1.* Розрахунок інтенсивності трафіку в каналах кожного маршруту  $m_{ab}$ , використовуючи моделі.

**Крок 2.** Розрахунок пропускної здатності (ПЗ) та середньої затримки передачі в кожному маршруті  $m_{ab}$  (згідно матриць  $\Gamma$  та  $\Pi$ ), використовуючи аналітичні співвідношення.

**Крок 3.** Перевірка умов  $\Omega_2$ : якщо  $s(m_{ab}) < s^0$  або  $t_3(m_{ab}) > t_3^0$ , тоді якість маршрутів в ЕРМ незадовільна, що потребує певного управлінського впливу (наприклад, виведення (переміщення) ТАП).

Для виконання кроків методики розроблено математичні моделі, які дозволяють розрахувати інтенсивність трафіку в кожному каналі БСМ із МС та ТАП.

Для широкомовного одночастотного каналу МС-МС інтенсивність трафіку можна визначити таким чином:

$$\lambda_i^{(1)} = \sum_{j \in N_i} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: i \in m_{ab}, \quad a \uparrow b \quad (3)$$

де  $N_i$  – множина сусідів  $i$ -ого МС, включаючи  $i$ .

Для спільного каналу МС-ТАП та широкомовного каналу ТАП-МС відповідно:

$$\lambda_{ik}^{(2)} = \sum_{i \in N_k} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: ik \in m_{ab}; \quad \lambda_{kj}^{(3)} = \sum_{i \in N_k} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab}, \quad a, b: kj \in m_{ab}, \quad a \uparrow b, \quad (4)$$

де  $N_k$  – множина МС, що покриті  $k$ -м ТАП.

Для дуплексного багаточастотного каналу ТАП-ТАП (в одному напрямку) відповідно:

$$\lambda_{kl}^{(4)} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K \left( \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \gamma_{ab} \right), \quad a, b: kl \in m_{ab}, \quad k \uparrow l, \quad a \uparrow b, \quad (5)$$

де  $K$  – кількість виведених ТАП.

Основними характеристиками, що визначають ефективність функціонування протоколу множинного доступу до загального каналного ресурсу, є [13, 14]: середня швидкість передачі, середня затримка передачі та граничне значення трафіку, за якого досягається межа стійкої роботи мережі (межа стійкості). Ці параметри визначаються як функція системних параметрів, серед яких основними є інтенсивність трафіку, швидкість передачі, довжина пакету, геометричні розміри мережі або узагальнюючий їх інтервал уразливості.

Середню швидкість передачі каналу МС-МС, що працює на частоті  $f_1$ , згідно з протоколом МДСЗ можна визначити за такою формулою [15]:

$$S_{\mu}^{(1)} = \frac{G_{\Sigma}^{(1)}}{(\exp(2aG_{\Sigma}^{(1)}) - 1)((5a + \tau + 0,5)G_{\Sigma}^{(1)} + \exp(-2aG_{\Sigma}^{(1)})) + G_{\Sigma}^{(1)}(4a + \tau + 1) + 1}, \quad (6)$$

де  $a, \tau$  – нормований максимальний час розповсюдження радіосигналу та сигналу «зайнято»;

$G_{\Sigma}^{(1)} = \frac{\lambda_i^{(1)}}{\mu} = \lambda_i^{(1)}T$  – сумарна інтенсивність трафіку, що надходить в канал МА-МА, нормована до тривалості передачі пакету  $T$ .

Застосовуючи, наприклад, адаптивний протокол випадкового МД із резервуванням (АПР), значення середньої швидкості передачі в каналах МС-ТАП можна визначити таким чином:

$$s_{ik}^{(2)} = \frac{GN \exp(-aG)}{1 + GB}, \quad (7)$$

де:  $N$  – розмір блоку пакетів, що резервуються;  $B$  – середній час зайнятого стану каналу, який можна визначити наступним чином:

$$B = (N + b + 2a - r) \exp(-aG) + b + a + r, \quad (8)$$

де:  $b$  – тривалість пакету резервування, що надсилає абонент, та пакету дозволу на передачу, що надсилає у відповідь ретранслятор;  $r$  – тривалість часу від надходження останнього конфліктного пакету, який можна визначити таким чином:

$$r = a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G}. \quad (9)$$

Враховуючи, що  $G$  – це інтенсивність надходження блоків з  $N$  пакетів, пропускна здатність каналів МС-ТАП, ТАП-ТАП обчислюється за виразом:

$$s_{ik}^{(2)} = \frac{GN \exp(-aG)}{1 + G((N + b + a + \frac{1 - \exp(-aG)}{G}) \exp(-aG) + b + 2a - \frac{1 - \exp(-aG)}{G})}. \quad (10)$$

**Наступна математична модель дозволяє обчислити затримки передачі в каналах БСМ із МС та ТАП.**

Організація інформаційної взаємодії на мережному рівні між будь-якою парою абонентів мережі потребує наявності маршруту передачі даних заданої якості (QoS). Критерієм якості або метрикою маршруту (наприклад, при передачі голосового трафіку) може виступати кількість ретрансляцій або ж величина затримки передачі пакету із кінця в кінець через мережу проміжних вузлів-ретрансляторів. У загальному вигляді ця величина матиме такий вигляд:  $D = T_{\text{нак}} + T_{\text{дост}} + T_{\text{розн}} + T_{\text{обр}} + T_{\text{буф}}$ , де  $T_{\text{нак}}$  – час пакетизації (формування пакету у вузлі-відправнику), що залежить від типу трафіку (алгоритму формування пакету, наприклад, для голосу – від типу кодеку);  $T_{\text{дост}}$  – середній час

затримки доступу до каналу (для випадкового МД), що залежить від інтенсивності трафіку та пропускної спроможності каналу;  $T_{розп}$  – час розповсюдження сигналу в середовищі передачі (не залежить від типу трафіка);  $T_{обр}$  – час обробки пакету в проміжних вузлах мережі (залежить від типу трафіку);  $T_{буф}$  – час затримки у буфері проміжних вузлах мережі (залежить від типу трафіку, дисципліни обслуговування, пріоритетності трафіку (SLA)). Для пакету IP середньої довжини 576 біт та при швидкості кодування 64кбіт/с час пакетизації становитиме 9 мс, чим можна знехтувати при грубій оцінці затримки передачі. Також будемо вважати, що пакети, які знаходяться на приймач, відразу потрапляють у буфер, а отже,  $T_{обр}$  також дорівнює нулю.

Використовуючи апарат теорії масового обслуговування, БСМ із МС та ТАП, можна представити через сукупність блоків М/Г/1.

Тоді середній час перебування пакета в черзі буферу можна розрахувати за такою формулою [15]:

$$T_{буф} = T + W^{(z)}(1 + v^2) = \frac{1}{\mu} + \frac{G_{\Sigma}^{(z)}}{2\mu(1 - G_{\Sigma}^{(z)})}(1 + v^2), \quad (11)$$

де  $W^{(z)}$  – середній час затримки пакету в черзі при  $\mu = const$ ;

$v$  – коефіцієнт варіації  $\propto$ ;

$G_{\Sigma}^{(z)} = \frac{\lambda_{\Sigma}^{(z)}}{\mu} = \lambda_{\Sigma}^{(z)}T$  – сумарна інтенсивність трафіку, що надходить на частоті  $z$ .

Було проведено імітаційне моделювання середнього часу перебування пакету в блоці типу М/Г/1, яке підтвердило адекватність обраної аналітичної моделі.

Середній час затримки передачі пакету на ланці МС-МС має такий спрощений вигляд:

$$D_{ij} = \left( \frac{G_{\Sigma}^{(1)}}{s_{ij}^{(1)}} - 1 \right) (4a + \tau + 0,5 + Y + X) + 4a + \tau + 1 + W_i^{(1)}, \quad (12)$$

де  $X$  – нормований середній час затримки повторної передачі;  $Y$  – нормований середній час початку передачі останнього конфліктуючого пакету.

У свою чергу, середній час затримки передачі пакету на ланці ТАП-ТАП (МС-ТАП) матиме вигляд:

$$D_{ik} = \frac{1}{N} \left( \left( \frac{1}{P} - 1 \right) (X + (b + a + r)P_i) + N + a + W_i^{(2)} + W_k^{(3)} \right)$$

де:  $P = \frac{\exp(-aG)}{1 + GB}$  – ймовірність вдалої передачі блоку пакетів;

$P_i = \frac{1}{1 + GB}$  – ймовірність вільного стану радіоканалу.

Оскільки канали ТАП-ТАП працюють із частотним розділенням, не заважаючи один одному, то будемо вважати, що максимальна затримка передачі в таких каналах однакова і визначається лише затримкою розповсюдження та затримкою в буфері проміжних вузлів, тобто  $D_{kl} = a + W_k^{(4)}$ .

Аналіз результатів розрахунків показав, що за інтенсивності трафіку менше ніж 30 менший час затримки має ланка мережі із застосуванням ТАП, аніж ланка МС-МС. При цьому граничне значення інтенсивності трафіку тим більше, чим більше розмір блоку пакетів в протоколі АПР. Також слід зазначити, що при однаковій затримці передачі ланка із ТАП має шестикратний виграв у відстані. Отже, для мінімізації затримки під час передачі інформації на великі відстані доцільніше передавати інформацію через мережу ТАП, а на короткі – через мережу МС.

Якщо вважати, що маршрут передачі інформації складається з  $l$  ланок, де кожна ланка має однакову середню інтенсивність трафіку, тоді загальна затримка пакету «із кінця в кінець» через мережі МС та мережі ТАП становитиме відповідно:

$$t(m_{ab}) = D_{ij} \cdot l; \quad t(m_{ab}) = D_{ik} + (a + W_k)l \quad (13)$$

Можемо бачити, що в даному випадку максимальна кількість ретрансляцій під час передачі через мережу МС, що визначається заданою величиною затримки ( $t_s^0 = 400 \text{ мс}$ ), має становити не більше 14. Для скорочення кількості ретрансляцій в маршрутах доцільніше передавати пакети через мережу ТАП. Причому всередині стільника вигідніше ретранслювати пакети при кількості ланок більше ніж 3, а через міжплатформні лінії зв'язку – більше ніж 4. Це може бути використане при пошуку оптимального (найкоротшого) маршруту між заданою парою відправник-адресат.

#### Математична модель визначення кількості абонентів в стільниках БСМ із МС та ТАП

Популяція мережі (число абонентів  $n$ ) може бути визначена таким чином. Для обраного протоколу МД встановлюється залежність пропускної спроможності каналу  $S$  від трафіку  $G$  при заданому значенні  $a$ , що визначається максимальною відстанню  $x$ . Наприклад, для гнучного МДСЗ вказана залежність відображається виразом (4), а для АПР – виразом (19). Абсциса екстремума функції  $S(G)$  або деякого її граничного значення (наприклад, 0,5) визначає гранично допустимий трафік



$G_{\max}$  для заданного протоколу при  $a=a_{\max}$ . Виходячи з вимог стійкості режиму мережі, ставимо наступну вимогу  $\sum_{i=1}^N \bar{G}_i < G_{\max}$ , де  $\bar{G}_i$  – середній трафік, що генерує кожен абонент стільника мережі.

Задаючись  $\bar{G}_i$ , знаходимо верхню границю числа абонентів стільника мережі:

$$n_{\max} \approx G_{\max} / \bar{G}_i. \quad (14)$$

За цієї кількості абонентів не виключено, однак, що середня затримка передачі пакетів  $D$  може мати значення, що перевищують допустимі. Тому скористуємось залежністю величини середньої затримки передачі від пропускної здатності протоколу МД  $D(S)$ , що визначається виразом (12) для МДСЗ та виразом для АПР. Задаючись допустимим значенням  $D_{\text{доп}}$ , знаходимо величину оптимального значення пропускної здатності протоколу  $S_{\text{опт}}$  та відповідну величину трафіку  $G_{\text{опт}}$ . Тоді оптимальну кількість абонентів стільника мережі можна визначити наступним чином:

$$n_{\text{опт}} = G_{\text{опт}} / \bar{G}_i. \quad (15)$$

Використовуючи вираз (4) та обмеження ПЗ  $S=0,5$  отримаємо наступні граничні допустимі трафіки: для стільника МС трафік пакетів становитиме  $G_{\max} \oplus 35$  при  $x=600\text{м}$ , для стільника ТАП трафік пакетів (при  $N=10$ ) становитиме  $G_{\max} \oplus 300$  при  $x=3000\text{м}$ . Тоді задаючись середнім трафіком пакетів одного абонента  $\bar{G}_i = 5$  та використовуючи вираз (15), максимальна кількість абонентів в зоні дії МС становитиме  $n_{\max} \approx 7$ , а в зоні дії ТАП – становитиме  $n_{\max} \approx 60$ . Максимальна кількість ТАП в зоні дії одного ТАП залежить від плану розподілу потоків між абонентами мережі, (тобто величини трафіку, що передається за межі стільника), але вочевидь, що не переважає декількох одиниць із міркувань щодо забезпечення заданої ЕМС та безаварійного переміщення ТАП у просторі.

Зрозуміло, що наведений розрахунок носить суто наближений характер через те, що окрім припущення щодо пуасонівського характеру потоку пакетів, ми задаємося середнім та рівним значенням трафіку, генерованого усіма абонентами, що не виконується на практиці. Не дивлячись на це, наведений розрахунок залишається справедливим за умови неперевикнення усіма абонентами сумарної допустимої величини трафіку в мережі, що обмежується максимальною середньою затримкою передачі. Саме цей параметр, виміряний кож-

ним абонентом мережі шляхом обліку часу отримання квитанцій на ряд переданих пакетів, може служити обмеженням на генерований їм трафік або визначати момент переключення передачі пакетів з мережі МС на мережу ТАП та навпаки. Знаючи кількість наземних абонентів, їх координати та трафік створюваний ними, ТАП може знайти своє оптимальне розміщення у просторі, що дасть змогу не тільки забезпечити геометричну зв'язність абонентів, а й підвищити інформаційні характеристики мережі (такі як пропускна здатність) завдяки з'єднання віддалених абонентів та розвантаження перевантажених каналів в районах скупчення абонентів. Зазначений принцип покладено в основу при розробці методу управління топологією мережі ТАП.

### Метод підвищення пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами

Суть розробленого методу полягає в побудові спеціальної обчислювальної структури на основі розглянутих вище математичних моделей оцінки структурної зв'язності та показників якості обслуговування мобільних сенсорів, а також удосконаленого алгоритму пошуку квазіоптимального положення ТАП, та поєднанні їх в єдину обчислювальну процедуру для досягнення близьких до екстремальних значень пропускної здатності мережі в режимі реального часу.

#### Математична постановка задачі

Представимо БСМ із МС та ТАП у вигляді стохастичного ненаправленого зваженого графу  $G(V,E)$ , що складається з множини вершин (МС та ТАП)  $V = \{v_i\} \cup \{b_k\}$  та множини ребер  $E = \{(i,j) \mid d_{ij} \leq d^0\} \cup \{(i,k) \mid R_{ik} \leq R^0\}$ ,  $i, j = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}$ , що визначають матрицю зв'язності  $C = \|c_{ij}\|$ , де  $c_{ij} = \{0, 1\}$  – булева змінна. У якості ваги ребра може виступати протяжність відповідної радіолінії ( $d_{ij} (R_{ik})$ ).

Пропускную здатність мережі у даному випадку можна визначити, як сумарну пропускну здатність усіх маршрутів мережі, тобто

$$S(C) = \sum_{m=1}^M \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s(m_{ab}), a \neq b, \quad \text{де} \quad (16)$$

$$s(m_{ab}) = \min_{(i,j) \in m} \{s(c_{ij})\}.$$

Нехай задані такі *вихідні дані*:  $N$  – кількість МС;  $K$  – кількість ТАП;  $r$  – розмір району дислокації МС,  $\text{м}^2$ ;  $(x_i, y_i)_t, i = \overline{1, N}$ ,  $(x_{0k}, y_{0k}), k = \overline{1, K}$  – координати МС та виведених ТАП в момент часу  $t$ ,  $\text{м}$ ;  $d^0(R^0)$  – максимальна дальність зв'язку,  $\text{м}$ ;

$s^0$  – мінімально допустиме значення ПЗ маршруту  $m_{ab}$ ;  $t_3^0$  – максимально допустиме значення затримки передачі маршруту  $m_{ab}$ ;  $\Pi_i = \|l(m_{ab})\|$ ,  $a, b = \overline{1, N}$  – маршрутна таблиця найкоротших шляхів, де  $l(m_{ab})$  – кількість ретрансляцій в маршруті;  $\Gamma = \|\gamma_{ab}(t)\|$  – матриця тяжіння.

Тоді можемо сформулювати наступну задачу управління положенням телекомунікаційних аероплатформ, що входять до складу БСМ із МС: знайти в режимі реального часу ( $T_{ном.р\ddot{u}м.} \ll T_{зв}$ ) координати положення ТАП у просторі  $X_{0k}$ ,  $k = \overline{1, K}$  (матрицю зв'язності  $C^*$ ), що забезпечує максимум пропускної здатності мережі  $S(C)$ :

$$C^* = \arg \max_{X_0 \in \Omega_{1,2,3}} S(C) = \arg \max_{X_0 \in \Omega_{1,2,3}} \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N s_{m_{ab}}, a \neq b \quad (17)$$

Під час виконання обмежень на множину управлінських дій та ресурси мережі

$$\Omega_1 : \{d_{ij} \leq d^0, D_{ik} \leq D^0, T_{зв\ ij} \geq T_{зв}^0 \ \forall i, j \in m_{ab}\},$$

$$\Omega_2 : \{s(m_{ab}) \geq s^0, \overline{t_3} \leq t_3^0 \ (l(m_{ab}) \leq l^0)\},$$

$$\Omega_3 : \{1030 \leq h < 3000, R^0 \leq 1500\}.$$

#### Метод підвищення пропускної здатності БСМ із МС та управлінням положенням ТАП

Для вирішення поставленої математичної задачі запропоновано метод управління положенням телекомунікаційних аероплатформ що входять до складу БСМ із МС.

Метод складається з таких основних етапів:

1. Ідентифікація математичної моделі оцінки зв'язності вузлів БСМ із МС та ТАП.

2. Ідентифікація математичних моделей оцінки показників ефективності функціонування БСМ із МС та ТАП.

3. Побудови алгоритму пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ.

#### Алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ

Задача пошуку оптимального розміщення ТАП (матриці зв'язності  $C_k$ ) відноситься до класу  $NP$ -повних. Застосування для її вирішення класичних методів приводить до експонентної складності. Отримання точного рішення для мережі, яка налічує сотні (тисячі) вузлів, потребує значних затрат часу. Тому для скорочення повного перебору варіантів розміщення ТАП пропонується використовувати сукупність правил, поєднаних в базу знань, що змінюють зв'язність мережі для підвищення

пропускної здатності мережі та скорочують час обчислень. Це дозволяє отримати в реальному часі близькі до оптимальних рішення та використовувати запропонований алгоритм для оперативного управління положенням ТАП. Критерієм визначення моменту перестройки топології мережі може бути невиконання однієї з умов  $\Omega_1$  або  $\Omega_2$ .

Застосування сукупності правил включає в себе ітераційну процедуру, що складається з модулів АНАЛІЗ, БАЗА ЗНАНЬ, УПРАВЛІННЯ та працює у такій послідовності:

1. Аналіз поточного стану мережі (розрахунок параметрів БСМ із МС та ТАП за допомогою ідентифікованих математичних моделей.

2. Перевірка параметрів мережі на множині правил. Якщо немає умов для виконання правил, то процедуру закінчити, інакше – застосувати правила з бази знань для зміни зв'язності мережі.

3. Обчислення параметрів модифікованої мережі.

Модуль АНАЛІЗ призначений для знаходження пропускної здатності мережі  $S$ , середньої затримки передачі пакетів  $t_3$  по маршрутах при заданому вхідному навантаженні  $\Gamma$ , маршрутних рішеннях  $\Pi$ , зв'язності  $C$  та протоколі доступу до каналу за допомогою математичних моделей розділу 3.

Модуль СУКУПНІСТЬ ПРАВИЛ включає в себе правила, що забезпечують напрямлений пошук зміни зв'язності, використовуючи параметри отримані з модуля АНАЛІЗ.

Модуль УПРАВЛІННЯ визначає момент закінчення застосування правил та виконує роль інтерпретатора [16], працюючи циклічно. У кожному циклі він продивляється всі правила, щоб виявити ті, посилки яких співпадають із відомими на даний момент фактами з пам'яті. Після вибору правило спрацьовує, його висновок вноситься в пам'ять, а потім цикл повторюється спочатку. В одному циклі може спрацювати тільки одне правило. Якщо декілька правил успішно зіставлені з фактами, то інтерпретатор на основі метаправил вибирає одне правило. Метаправила визначають перевагу правил в залежності від  $k$ -ї цілі управління мережею ( $MP_i$ :  $Pr_i \rightarrow w^k_i$ ). Те правило, що в більший ступені покращує потрібні параметри, буде мати більшу вагу  $w^k_i$ .

Ключовою особливістю в запропонованій процедурі є сукупність правил. Усі правила класифіковано на три групи: 1) для забезпечення вимог до зв'язності мережі ( $\Omega_1$ ); 2) для забезпечення вимог до функціональних показників ( $\Omega_2$ ); 3) для підвищення пропускної здатності мережі. Керованим

параметром є взаємне розташування вузлів, а саме положення ТАП відносно мобільних сенсорів. Запропоновані правила аналізують структуру графа мережі та намагаються створити таку структуру мережі, що буде мати найбільшу продуктивність, виявляючи перевантажені ділянки мережі та намагаючись пере направити потоки по маршрутам з меншою завантаженою. Всі правила, незалежно від цілей управління, визначають наступну дію – вивід або зміну позиції ТАП у просторі, що призводить до зміни кількості вузлів у зоні покриття ТАП.

Запропоновано нові модифіковані правила та відповідні управлінські дії (щодо квазіоптимального розміщення ТАП у просторі). Розглянемо їх детальніше.

**Правило № 1.** Якщо кількість компонент зв'язності (незв'язних підграфів) графу мережі  $k > 1$ , тоді телекомунікаційну аероплатформу (ТАП) необхідно розмістити так, щоб з'єднати якомога більшу кількість компонент зв'язності.

**Мета-правило № 1.** Якщо є декілька варіантів розміщення ТАП, що поєднує однакову кількість компонент зв'язності, то обрати той, що покриває більшу кількість вузлів цих компонент.

**Правило № 2.** Якщо середня затримка передачі (кількість ретрансляцій) в деяких маршрутах більше необхідної, тоді ТАП необхідно розмістити так, щоб зменшити середню затримку передачі (кількість ретрансляцій) в маршруті.

**Мета-правило № 3.** Якщо є декілька варіантів розміщення ТАП, що однаково зменшує затримку в маршрутах, то слід обрати той, що дозволяє максимізувати ПЗ маршрутів.

Для того щоб зменшити середню затримку передачі (кількість ретрансляцій у маршруті), необхідно розмістити ТАП так, щоб покрити пару заданих вузлів відправник-адресат у кращому випадку або ж пару найбільш віддалених (по кількості ретрансляцій) вузлів маршруту.

**Висновки.** У статті викладено результат розв'язання науково-технічної задачі щодо роз-

робки методу підвищення пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних сенсорів.

Головні наукові і практичні результати статті полягають у такому:

1. Удосконалено математичну модель оцінки зв'язності вузлів безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами. Суть удосконалення моделі полягає в тому, що запропоновано поєднати сукупність аналітичних моделей оцінки достовірності передачі даних в радіоканалах із сукупністю аналітичних моделей прогнозування переміщення мобільних абонентів.

2. Досліджено математичні моделі оцінки функціональних показників безпроводових сенсорних мереж із мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами, що базується на детальному розрахунку трафіку в мережі та втрочених аналітичних співвідношеннях для оцінки пропускної здатності та середньої затримки передачі.

3. Удосконалено алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ. Суть удосконалення алгоритму полягає в тому, що вдалося уникнути повного перебору варіантів розміщення телекомунікаційних аероплатформ завдяки використанню попередньо розробленої сукупності правил відбору варіантів такої зміни зв'язності мережі, що підвищують її пропускну здатність, а також зменшують час обчислень.

4. Розроблено метод підвищення пропускної здатності епізодичних радіомереж з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ. Відмінність розробленого методу від відомих полягає в тому, що вперше запропоновано об'єднати в єдину обчислювальну процедуру математичні моделі оцінки зв'язності та якості обслуговування мобільних абонентів, а також удосконалений алгоритм пошуку квазіоптимального положення телекомунікаційних аероплатформ.

#### Список літератури:

1. O. Lysenko, M. Sparavalo, V. Romaniuk, S. Valuiskiy. Intelligent control system for wsn and manet. Information and Telecommunication Sciences, 2019, Volume 10, Number 2, p. 12-21. "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". ISSN 2312-4121. URL : <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/188348>.
2. Лисенко О.І. Визначення показників векторного критерію для оцінки зв'язності безпроводових епізодичних мереж із використанням безпілотних літальних апаратів. Збірник наукових праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАНУ. 2010. Вип. 57. С. 134–141. URL : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/28234>.
3. Лысенко А.И. Перспективы и проблемы создания систем связи на основе беспилотных летательных аппаратов. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо '2009) : 19-я междуна- р. крымская конф., 14-18 сен. 2009г. : материалы конф. Севастополь, 2009. Т.1. С. 259–260. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/5293146>.



4. Лысенко А.И. Оценка связности беспроводных эпизодических сетей. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМуКо '2010) : 20-я междунар. крымская конф., 13-17 сен. 2010 г. : материалы конф.* Севастополь, 2010. Т. 1. С. 439–440. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5632352>.
5. Лысенко А.И. Метод оптимального управления топологией сети беспилотных летательных аппаратов. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМуКо '2010) : 20-я междунар. крымская конф., 13-17 сен. 2010 г. : материалы конф.* Севастополь, 2010. Т.1. С. 333–334. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5632643>.
6. Lysenko O. The optimal control of UAV network topology. *Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies : fourth world congress, 21-23 September 2010 : proceedings.* Kyiv, 2010. P. 1637–1640. (розглянуто принципи управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів). URL : [http://congress.nau.edu.ua/doc/congress-2010/Congress\\_2010\\_V1.pdf](http://congress.nau.edu.ua/doc/congress-2010/Congress_2010_V1.pdf).
7. Лысенко А.И. Расчет длительности связности абонентов мобильных радиосетей. *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМуКо '2011) : 21-я междунар. крымская конф., 12-16 сен. 2011г. : материалы конф.* Севастополь, 2011. Т. 1. С. 361–362. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6068966>.
8. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загальною ред. В.В. Поповського. Харків : ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. 564 с.
9. Chen J.-K. Expected link life time analysis in manet under manhattan grid mobility model / J.-K. Chen, C. Chen, R.-H. Jan, H.-H. Li // *Analysis and simulation of wireless and mobile systems : the 11th ACM international conference on modeling, October 27-31 2008 : proceedings.* Vancouver, 2008. P. 162–168. URL : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1454503.1454534>.
10. Zhao M. A Unified Mobility Model for Analysis and Simulation of Mobile Wireless Networks. *Wireless Networks.* 2009. vol. 15. P. 365–389. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11276-007-0055-4>.
11. Минович А. И. Управление топологией мобильной радиосети. *Зв'язок.* 2003. № 2. С. 28–33. URL : [http://www.viti.edu.ua/files/rom/2003/5\\_2003.pdf](http://www.viti.edu.ua/files/rom/2003/5_2003.pdf).
12. Бахтин А.А. Разработка методов управления связностью и обеспечения качества обслуживания в мобильной эпизодической сети с ретрансляцией : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций». Москва, 2009. 27 с.
13. Бунин С.Г. Вычислительные сети с пакетной радиосвязью. Киев : Техника, 1989. 223 с.
14. Kleinrock L. Packet switching in radio channels: Part 1 – Carrier sense multiple-access modes and their throughput-delay characteristics. *IEEE Transactions on communications.* 1975. Vol. 23. № 12. P. 1400–1416.
15. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями. Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. Москва : Мир, 1979. 600 с.
16. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем. Санкт-Петербург : Питер, 2000. 384 с.

**Novikov V.I., Lysenko O.I., Valuyskyy S.V., Guida O.H. MATHEMATICAL MODELS, METHODS AND ALGORITHMS FOR OPTIMIZING PERFORMANCE OF THE WIRELESS SENSOR NETWORKS WITH MOBILE SENSORS AND TELECOMMUNICATION AIR PLATFORMS**

*The article is dedicated to mathematical models, methods and algorithms for increasing the throughput and connectivity of wireless sensors networks with mobile sensors and telecommunication air platforms in terms of their rapid and unpredictable movement. The principles of functioning and methods of increasing the throughput of wireless sensor networks with mobile sensors and telecommunication air platforms are analyzed. The mathematical model for estimating the connectivity of wireless sensor network nodes with mobile sensors and telecommunication air platforms has been improved, which will allow not only to determine the presence of connectivity, but also to predict its duration in conditions of rapid and unpredictable change of mobile sensors position. It was described the mathematical models for estimating the performance of wireless sensor networks with mobile sensors and telecommunications air platforms, namely the bandwidth and the average transmission delay between a given pair sender-destination. It was improved the algorithm for finding the quasi-optimal position of telecommunication air platforms, which will allow in the process of current operation of wireless sensors networks with mobile sensors and telecommunication air platforms to find rational solutions of telecommunication air platforms topology configuration problem when changing their operating conditions (telecommunication air platforms and mobile sensors failures, external perturbations, unpredictable displacements of mobile sensors). A method for increasing the throughput of wireless sensors networks with mobile sensors and telecommunication air platforms together with control of the position of telecommunication air platforms has been developed, which will improve the quality of information support of the monitoring system in the disaster zone.*

**Key words:** telecommunication air platforms, mobile sensors, wireless sensors networks, unmanned aerial vehicles (drones), mathematical methods and models.



УДК 621.396.967(075.8)

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/10>**Орлов А.Т.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Трапезон К.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ІНФРАЗВУКОВИХ СЕНСОРІВ У РАЗІ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ

Наведено два підходи для виявлення повітряних об'єктів в рамках класичної теорії локації. Перший підхід пов'язаний з оцінкою напруженості електричного поля уздовж траєкторії польоту літального апарату. Другий підхід полягає в оцінці випромінювання з боку літального апарату на основі роботи мобільної пасивної радіолокаційної станції і набору інфразвукових сенсорів. Запропоновано технічне рішення щодо поєднання під час виявлення літальних апаратів пасивного пеленгатору сигналів і активного радіолокаційного далекоміру. Такий спосіб дозволяє швидше розв'язати задачу локації і визначити координати та траєкторію руху літального апарату. Проаналізовані вимоги до інфразвукових пеленгаторів сигналів на основі перетворення формули з визначення дальності пасивної радіолокації. Відмічено, що необхідна дальність дії пасивних пеленгаторів досягається істотно меншими енергетичними витратами. На основі проведеного аналізу в рамках дослідження сформульовані особливості функціонування інфразвукових сенсорів. Так, наголошено, що інфразвуковий сенсор через певні особливості розповсюдження інфразвукових сигналів в просторі може забезпечити більш раннє виявлення цілі у порівнянні з роботою стандартної радіолокаційної станції, яка працює на випромінювання. Запропоновано рішення щодо можливості використання в пасивній радіолокаційній станції набору інфразвукових сенсорів. Цей прийом дозволяє швидше розв'язати задачу пасивної локації, адже збільшується при цьому і точність, і кількість інформаційних каналів, які надають інформацію про ціль. Визначено положення, які слід враховувати під час виявлення повітряних об'єктів, які рухаються на низьких висотах. Зокрема, оцінка ефективності роботи традиційної радіолокаційної станції вимагає врахування екрануючої дії місцевості. За використання ж інфразвукових сенсорів така оцінка місцевості не є основною під час розв'язання задачі локації.

**Ключові слова:** локація, пеленгатор, сигнал, сенсор, перешкода, інфразвук, мобільна радіолокаційна станція.

**Постановка проблеми.** Розв'язання задачі локації в умовах наявної радіоелектронної боротьби та стрімкої модернізації конструкцій літальних апаратів потребує все нові підходи до точного і швидкого визначення координат літальних апаратів. Одним із запропонованих підходів може бути використання інфразвукових сигналів як носіїв інформації з визначення місця розташування цілі. Особливо таке рішення може бути доцільним, коли літальний апарат переміщується на низьких висотах (до 10 км) і традиційні системи протиповітряної оборони при цьому не можуть ефективно працювати. Проблема ж полягає не лише в алгоритмі застосування інфразвукових сигналів і теорії їх розповсюдження, але й у способі обробки інформації на тлі наявного екранування місцевості та перешкод, як активних, так і пасивних. Особливо це важливо, коли використовуються так звані «інтелектуальні» радіо-

перешкоди. Зрозуміло, що проблема розв'язання задачі локації при цьому буде пов'язана і з точністю визначення координат літального апарату. І вибір пасивного інфразвукового пеленгатору відіграє в цьому не останню роль. Очевидно, що традиційні локаційні станції з секторним чи круговим оглядом можуть призвести до ситуації, за якої визначення координат об'єкта, особливо коли він переміщується на вкрай низьких висотах, є неможливим.

**Постановка завдання.** На основі наявних підходів з виявлення літальних апаратів у рамках класичної теорії локації необхідно запропонувати рішення щодо конструкції пасивного пеленгатору сигналів, за умови, коли останній оперує інфразвуковими сигналами. При цьому необхідно врахувати вимоги до інфразвукового пеленгатору і сформулювати особливості на основі формули дальності радіолокації з роботи останнього

в умовах радіоелектронної боротьби. Додатково необхідно розробити схему прийому інфразвукових сигналів для мобільної радіолокаційної станції з вибором методу визначення місця розташування повітряних об'єктів.

**Метою статті є** визначення підходів зі створення пасивної системи виявлення літальних апаратів, які переміщуються на низьких висотах. Додатково необхідно запропонувати технічні рішення з розташування елементів пасивного пеленгатору сигналів в умовах підвищеної завадової обстановки.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для виявлення повітряних об'єктів можна використовувати різні підходи [1–4]. У рамках дослідження розглянемо два підходи: на основі оцінки напруженості електричного поля і на основі радіо-теплого випромінювання з залученням пасивного радіолокаційного пристрою та інфразвукових сенсорів.

В основі першого підходу знаходиться принцип, за яким під час польоту в атмосфері, де зосереджені хмари і можливі опади на літальному апараті (ЛА), накопичується електричний заряд  $10^{-7} \div 10^{-4}$  Кл. Величина заряду залежить від швидкості руху, матеріалу корпусу ЛА і стану атмосфери. Накопичення електричного заряду на корпусі ЛА призводить до зміни напруженості електричного поля  $\vec{E}$  уздовж траєкторії польоту ЛА (рис. 1). Реєстрація та обробка зміни електричного поля дозволяє встановити факт наявності об'єкту і дозволяє визначити координати цього об'єкту [5–7]. Реєстрація змін електричного поля здійснюється електро-

статичними сенсорами. Електростатичні сенсори здійснюють обробку корисного сигналу, природних перешкод і прийняття рішення про виявлення ЛА, яке разом з оцінкою часу виявлення передається в пункт спільної обробки (ПСО). Чутливий елемент сенсора (рис. 1) являє собою перетворювач напруженості електричного поля на напругу, який використовує вільні заряди в провіднику. Обробка сигналів у сенсорі включає компенсацію завад, виділення корисного сигналу та прийняття рішення про тип літального апарату. Punkt спільної обробки реалізовано програмним чином і він призначений для управління системою виявлення та визначення координат літального апарату.

Другим підходом визначення наявності повітряних об'єктів є використання пасивної радіолокації, де виявлення реалізується без опромінення на основі природного радіо-теплого випромінювання цілей з залученням пасивного радіолокаційного пристрою, до якого входить приймач в інфразвуковому діапазоні та антенна система. Цей пристрій називають ще пасивним пеленгатором, і він може складати основу мобільної пасивної радіолокаційної системи [7].

Основною перевагою пасивних пеленгаторів є скритність його роботи, а недоліком – складність селекції об'єкта по дальності. У зв'язку з цим найбільш доцільно використання пасивного радіолокаційного пристрою в сукупності з радіолокаційними далекомірами. Використання в одному пристрої пасивного (радіометричного) режимів роботи дозволило б компенсувати позитивні якості і звести до мінімуму їх недоліки. Таке

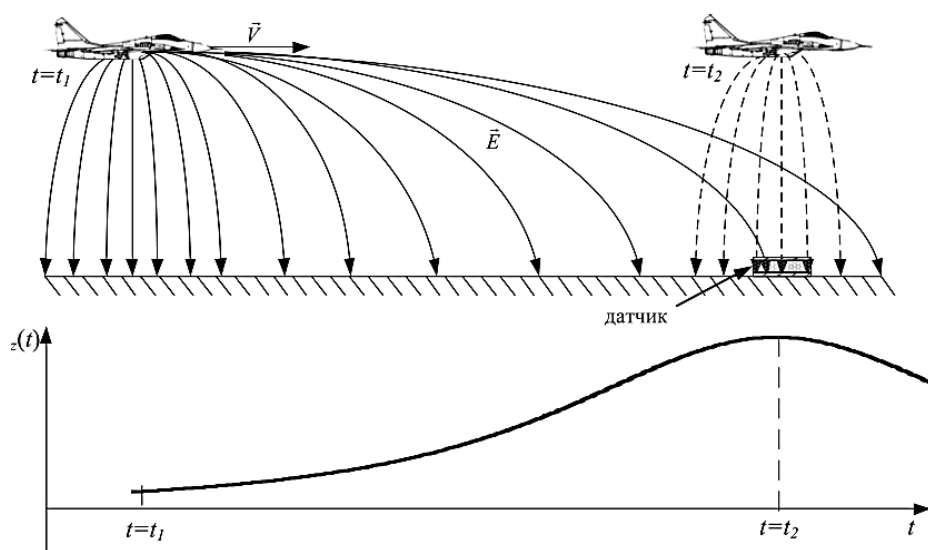


Рис. 1. Принцип виявлення цілі пасивним сенсором інфразвуку

комплексування дозволяє отримати нові позитивні якості станції, зокрема, в пасивному режимі можливий огляд простору (без випромінювання НВЧ енергії), а в активному режимі можливо вимірювання дальності до виявленого об'єкту. Активний радіолокаційний далекомір – це радіолокаційний пристрій, який можна розглядати як аналог активної радіолокаційної станції. Для таких систем (з дальністю дії до 1 км – в пасивному режимі роботи і 1,5 км в активному режимі) може бути використано робочий діапазон хвиль у «вікнах прозорості» короткохвильової частини міліметрових діапазонів радіохвиль (довжини хвиль 1,3 і 2,15 мм).

### **Особливості функціонування пасивних пеленгаторів**

Однією з основних вимог до інфразвукового пеленгатора, або по-іншому – інфразвукового сенсора, є дальність дії, яку можна визначити через перетворення формули дальності пасивної радіолокації:

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{\Delta T_0 S_0 G}{4\pi q_m \Delta T_{np}}} \cdot 10^{-0.005\gamma}, \quad (1)$$

де  $\Delta T_0$  – величина радіоконтрасту цілі;  $S_0$  – площа цілі;  $G$  – коефіцієнт підсилення фотопровідної антени;  $q_m$  – коефіцієнт розрізненості, який враховує перевищення сигналу від об'єкту над чутливістю пасивного радіолокаційного пристрою;  $\gamma$  – коефіцієнт послаблення хвиль в атмосфері;  $\Delta T_{np}$  – флукуаційна чутливість приймача. При цьому слід відмітити, що необхідна дальність дії пасивних пеленгаторів досягається істотно меншими енергетичними та масо-габаритними витратами, що очевидно впливає з порівняння формул дальності радіолокації (1) і дальності пасивного пеленгування:

$$D_{nn} = \sqrt{\frac{P_{\text{пер}} G_{\text{МРЛС}} G \cdot \lambda^2}{16\pi^2 \cdot P_{\text{прмПП}}}},$$

де  $P_{\text{пер}}$  – вихідна потужність передавача мобільної радіолокаційної станції;  $G_{\text{МРЛС}}$  – коефіцієнт підсилення антени мобільної станції;  $\lambda$  – довжина хвилі під час передавання та прийому;  $P_{\text{прмПП}}$  – чутливість приймача пасивного пеленгатора. На основі наведених співвідношень можна сформулювати в рамках дослідження такі головні особливості функціонування пасивних пеленгаторів.

По-перше, пасивний пеленгатор, побудований на основі детекторних приймачів з чутливістю  $10^{-7}$  Вт і встановлений на об'єкті з ефективною

площею розсіювання до 3000 м<sup>2</sup>, буде забезпечувати більш раннє виявлення об'єкта з випромінюючої стандартної навігаційної радіолокаційної станції в порівнянні з виявленням цієї станцією носія такого пеленгатора.

По-друге, частотні характеристики антен і приймачів пасивного пеленгатора принципово можуть бути реалізовані в досить широкому діапазоні (з перекриттям до 4), що забезпечує можливість виявлення і пеленгування станціями, які працюють на самих різних частотах і мають різне призначення.

По-третє, застосування спеціальних засобів і алгоритмів обробки сигналів, які виявляються пасивним пеленгатором, дозволяє визначати великий перелік параметрів випромінюючих станцій, сукупність яких забезпечує високу ймовірність визначення типу не тільки радіолокаційної станції, але і її носія. До таких параметрів належать передусім несуча частота передавача станції, тривалість, період повторення і форма зондуючих імпульсів, форма і ширина діаграми спрямованості, період сканування антени станції тощо.

Більшість відомих способів визначення напрямку приходу прийнятих радіолокаційних сигналів засновані на обчисленні і перетворенні фазових і / або амплітудних співвідношень у прийомних каналах, підключених до антен, які мають певні діаграми спрямованості (ДС) і певним чином орієнтовані на об'єкт-ціль.

### **Підходи до виявлення повітряних об'єктів**

Використання в мобільній радіолокаційній станції декількох сенсорів (рис. 2) дозволяє визначити прямокутні координати, напрямок та швидкість польоту за різницею часів виявлення сенсорами літального апарату. Для однозначного визначення типу цілі слід використовувати в складі мобільної радіолокаційної станції не менше трьох сенсорів. Задля виконання задачі пасивної локації сенсори розміщуються на місцевості з частковим перекриттям зон виявлення. Розміри зони виявлення сенсорів системи мобільної радіолокаційної станції характеризуються такими показниками:

- Ширина зони виявлення за фронтом 2...9 км;
- Відстань між сенсорами 100...450 м;
- Діапазон висот руху цілей, що виявляються – 5...500 м.

Поєднання інфразвукових сенсорів з блоками цифрової обробки сигналів дає можливість збільшити число одночасно інформаційних каналів, які аналізуються і тим самим виключають вплив рівня сигналів, які надходять на загальну точність визначення дальності до цілі.

Для того щоб сформулювати вимоги до програмно-апаратної реалізації цифрової частини пеленгатора, необхідно уточнити, яким чином проводиться визначення відстані від імпульсного джерела інфразвуку до бази пристрою. Традиційно визначення відстані здійснюється на основі аналізу інфразвукових хвиль, відбитих від цілі. Також відомий спосіб визначення відстані на основі аналізу інфразвукових хвиль, які відбиваються від цілі: спочатку обчислюється азимут, а потім визначається відстань до джерела відносно пеленгаційного пристрою.

Відомо кілька методів визначення місця розташування об'єктів за допомогою сигналів (пеленгаційний, далекомірний, різницево-далекомірний, пеленгаційно-далекомірний).

Але для аналізу інфразвукових хвиль може застосовуватись лише пеленгаційний метод. Зазначений метод заснований на обчисленні азимута цілі в рознесених на відстань бази  $b$  двох пеленгаційних пристроїв (точки «А» і «В» на рис. 3).

Очевидно, що під час виявлення мобільними радіолокаційними системами повітряних об'єктів на низьких висотах значну екрануючу дію створює рельєф місцевості і місцеві предмети, що призводить до зменшення дальності дії локаційної системи. Проведення оцінок ефективності роботи радіолокаційних систем по таких апаратах вимагає врахування екрануючої дії місцевості. При цьому одним із найбільш раціональних способів підвищення ефективності виявлення низькоповітряних об'єктів радіолокаційними засобами є підйом фазового центру антени радіолокаційної системи над землею поверхнею. Також виявлення сигналу, відбитого від об'єкта, буде проводитися на тлі інтенсивних перешкод – відображень від земляної поверхні і місцевих предметів, що передбачає реалізацію високоефективної системи придушення (ком-

пенсації) пасивних перешкод. Ці два фактори у вирішенні проблеми виявлення маловисотних повітряних об'єктів можна виділити як основні.

### **Проблеми локації об'єктів на фоні перешкод**

На практиці в наявних мобільних радіолокаційних системах здебільшого використовуються алгоритми, засновані на розпізнаванні по траєкторних ознаках. Це можна пояснити тим, що технічні параметри радіолокаційної станції зазвичай оптимізуються для вирішення завдання виявлення сигналу на фоні перешкод. При цьому алгоритми розпізнавання, як «другорядні» доводиться синтезувати з свідомо «неоптимальними» параметрами. Найбільш показовий (який часто зустрічається на практиці) приклад – випадок короткої вибірки сигналу. Останнім часом у зв'язку з постійним і інтенсивним розвитком технологій і засобів радіоелектронного боротьби вкрай актуальною є проблема розпізнавання і захисту від інтелектуальних радіоперешкод, до яких передусім належать імітуючі сигналоподібні радіоперешкоди. Перешкоди цього класу призводять до найбільш істотного порушення функціонування радіолокаційних систем і дезорієнтації шляхом формування на індикаторі відміток від помилкових об'єктів. Результатом впливу таких перешкод є, наприклад, невиявлення сигналів луни від об'єкта або перевантаження обчислювальної системи через обробку великого об'єму невірної інформації. Варіанти побудови радіотехнічних систем, які формують псевдорадіоперешкоди, вельми різноманітні, однак в основі таких систем побудови лежить принцип ретрансляції зондуючого сигналу зі зміненими параметрами, що містять інформацію про координати і швидкості об'єкта. Особливо варто наголосити на важливості розгляду перешкод цього класу і методів захисту від них у рамках проблеми виявлення низько повітряних об'єктів. Це пояснюється тим, що найбільш перспективним напрямом

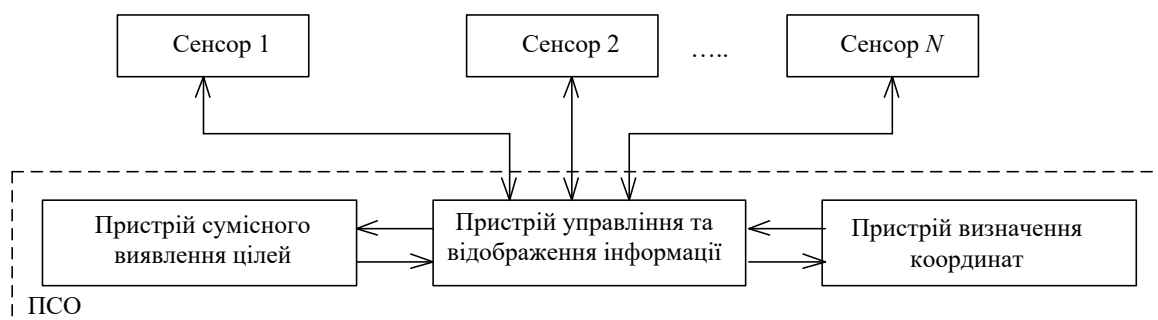


Рис. 2. Схема системи прийому сигналів



технічної реалізації радіосистем є завадостворювачі їх розміщення на літальних апаратах різних класів, які діють на малих і надмалих висотах. Ще одним напрямом інтелектуальних радіоперешкод, який активно розвивається останнім часом, є так званий «GPS-спуфінг» – підміна сигналу від космічного GPS-супутника хибним більш потужним сигналом. Для захисту від дії імітують сигналоподібні радіоперешкоди. Є ряд методів захисту від інтелектуальних перешкод на різних етапах обробки радіолокаційної інформації. Однак у багатьох випадках ці методи не завжди ефективні, оскільки вимагають впровадження додаткових апаратних засобів, апріорних знань про сигнально-завадове оточення. Для радіолокації характерно багатопроменеве поширення сигналів через наявність земної поверхні, вплив якої особливо істотно за малих кутів місця. Тому в вертикальній площині зона виявлення має «порізаний» вигляд з чергуванням максимумів і мінімумів. Наявність мінімумів може привести до втрати цілі на відповідних кутах місця. Найсильніше цей небажаний ефект проявляється при виявленні повітряних об'єктів на малих і гранично малих висотах (50–500 м), тобто за малих кутів місця. При цьому очевидно, що цей ефект буде також залежати від діапазону довжин хвиль і висоти фазового центру антени.

**Висновки.** Наведено підходи з виявлення повітряних об'єктів у рамках класичної теорії локації. Перший підхід пов'язаний з оцінкою напруженості електричного поля  $\vec{E}$  уздовж траєкторії польоту літального апарату (рис. 1). Другий підхід полягає в оцінці випромінювання з боку літального апарату на основі аналізу роботи мобільної пасивної радіолокаційної станції та набору розміщених у просторі інфразвукових

сенсорів. Запропоновано технічне рішення щодо поєднання під час виявлення літальних апаратів пасивного пеленгатору сигналів і активного радіолокаційного далекоміру. Такий спосіб дозволяє швидше розв'язати задачу локації і визначити координати та траєкторію руху літального апарату.

Проаналізовані вимоги до інфразвукових пеленгаторів сигналів на основі перетворення формули з визначення дальності пасивної радіолокації. Відмічено, що необхідна дальність дії пасивних пеленгаторів досягається істотно меншими енергетичними витратами. На основі проведеного аналізу в рамках дослідження сформульовані особливості функціонування інфразвукових сенсорів. Так, наголошено, що інфразвуковий сенсор через особливості розповсюдження інфразвукових сигналів у просторі може забезпечити більш раннє виявлення цілі у порівнянні з часом захоплення цілі радіолокаційною станцією, яка працює в активному режимі на випромінювання. Запропоновано рішення щодо можливості використання в мобільній пасивній радіолокаційній станції набору з трьох інфразвукових сенсорів (рис. 2). Цей прийом дозволяє швидше розв'язати задачу пасивної локації, адже збільшується при цьому і точність визначення координат і кількість інформаційних каналів, які надають інформацію про ціль. Визначено положення, які слід враховувати під час виявлення повітряних об'єктів, що рухаються на низьких висотах. Зокрема, оцінка ефективності роботи традиційної радіолокаційної станції вимагає врахування екрануючої дії місцевості. За використання ж інфразвукових сенсорів така оцінка місцевості не є основною під час розв'язання задачі локації.

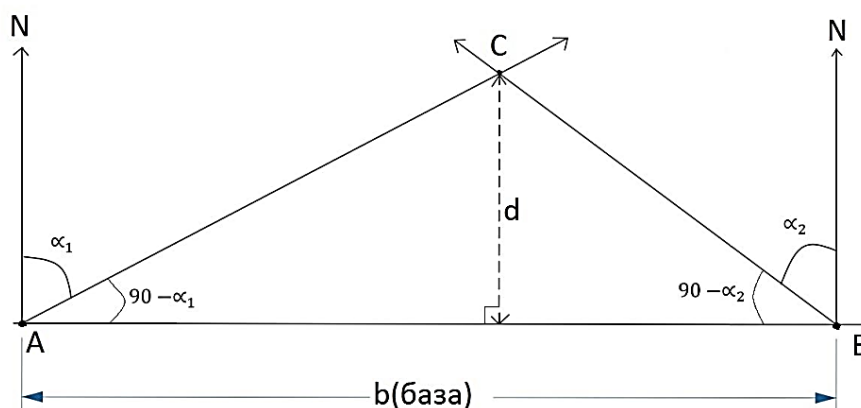


Рис. 3. Метод визначення відстані до цілі

**Список літератури:**

1. Бердышев В.П. Радиолокационные системы. Красноярск : «СФУ», 2012. 402 с.
2. Дудник П.И. Многофункциональные радиолокационные системы. Москва : «Дрофа», 2007. 283 с.
3. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Москва : «Радиотехника», 2007. 376 с.
4. Пятко С.Г., Красов А.И. Автоматизированные системы управления воздушным движением. Санкт-Петербург : «Политехника», 2004. 446 с.
5. Ботов М.И., Вяхирев В.А. Основы теории радиолокационных систем и комплексов. Красноярск : «СФУ», 2013. 530 с.
6. Соколов А.В. Вопросы перспективной радиолокации. Москва : «Радиотехника», 2003. 512 с.
7. Ботов М.И. Введение в теорию радиолокационных систем. Красноярск : «СФУ», 2012. 346 с.

**Orlov A.T., Trapezon K.O. INVESTIGATION OF FEATURES OF INFRASOUND SENSORS IN THE DETECTION OF AIR OBJECTS**

*There are two approaches to detecting air objects in classical location theory. The first approach involves estimating the electric field strength along the flight path of the aircraft. The second approach is to evaluate the radiation from the aircraft based on the operation of a mobile passive radar station and a set of infrasound sensors. A technical solution for the combination of a passive direction finder and an active radar rangefinder in aircraft detection is proposed. This method allows you to quickly solve the problem of location and determine the coordinates and trajectory of the aircraft. The requirements for infrasonic signal direction finders based on the transformation of the formula for determining the range of passive radar are analyzed. It is noted that the required range of passive direction finders is achieved by significantly lower energy costs. On the basis of the conducted analysis within the limits of research features of functioning of infrasound sensors are formulated. Thus, it is emphasized that the sensor due to the peculiarities of the propagation of infrasonic signals in space can provide earlier detection of the target in comparison with the operation of a standard radar station that works on radiation. A solution for the possibility of using a set of infrasonic sensors in a passive radar station is proposed. This technique allows you to solve the problem of passive location faster, because it increases the accuracy and number of information channels that provide information about the goal. The provisions that should be taken into account when detecting air objects moving at low altitudes have been identified. In particular, the assessment of the efficiency of a traditional radar station requires consideration of the shielding action of the area. When using infrasonic sensors, such an assessment of the terrain is not the main one in solving the problem of location.*

**Key words:** location, direction finder, signal, sensor, interference, infrasound, mobile radar station.

УДК 004.738

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/11>**Переверзєв О.А.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Гумен Т.Ф.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Трапезон К.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ LPWAN У СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ОХОРОНИ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

Розглянуто найбільш розповсюджені типи топологій з'єднання елементів у розрізі концепції Інтернету речей. Доведено, що найбільш зручною топологією для мережі з низьким електроспоживанням можна вважати топологію типу «зірка». Такий вибір зумовлений простотою реалізації архітектури мережі на основі концепції Інтернету речей та широкими можливостями з модернізації мережі, у зв'язку з відповідним налагодженням та функціонуванням пристроїв мережі. Іншою перевагою такого підходу є критерій мінімального електричного споживання системи. Проаналізовано фізичний та каналний режими системи пристроїв на основі Low Power Wide Area (LPWA). За результатами аналізу виявлено, що технологія LPWA за прийнятим протоколом використовує неліцензійну смугу радіочастот і загальнодоступний протокол, а це своєю чергою створює можливості до спроб зовнішнього втручання в мережу. Зловмисник може прослуховувати адресу легального терміналу і генерувати підроблені пакети на шлюз, щоб викликати перевантаження ланки мережі. Наведено класифікацію класів кінцевих пристроїв, які працюють в рамках технології LPWAN. Знайдено, що найбільш зручним за енергоефективністю та повною сумісністю з сенсорами IoT є клас А пристроїв. Запропоновано алгоритм, за яким можуть функціонувати окремі LoRA-модулі системи задля забезпечення принципу мінімального споживання електричної енергії.

Як практичне спрямування дослідження наведено варіант архітектури системи безпеки будівлі на основі LoRa-модулів. Ця архітектура вирізняється модульністю підключених пристроїв і може бути розширена шляхом підключення нових IP-камер без переналагодження зв'язків інших елементів з постом охоронної сигналізації. Надані рекомендації з архітектури мережі в рамках дослідження можуть забезпечити надалі під час реалізації підвищений рівень надійності роботи елементів системи охорони житлового будинку. Загалом же проведені дослідження та окремі його пункти можуть слугувати основою для модернізації наявних систем охорони будівель, де управління та моніторинг стану об'єкту реалізовано на основі збору даних від контрольних пристроїв приміщення з подальшим їх пересиланням на пульта безпеки системи.

**Ключові слова:** клас, LPWAN мережі, РНУ рівень, передача даних, LORA-модулі, смуга частот, енергоспоживання, архітектура мережі, шлюз.

**Постановка проблеми.** Зі збільшенням кількості підключених пристроїв в Інтернеті речей (IoT) зростають паралельно вимоги і до підключення цих пристроїв (наприклад, ресурсу акумулятора, вартості розгортання та покриття) для забезпечення ефективної комунікації між цими пристроями. Нові технології малої потужності (LPWA) відкривають шлях для розв'язання проблеми, оскільки вони можуть забезпечити доступне підключення до пристроїв з малим енер-

госпоживанням на дуже великих площах. Загальновідомо, що в класичних схемах розгортання систем охорони приміщень ситуація з управлінням ще більше може ускладнюватись з технічного боку, коли необхідно збільшити не лише кількість контрольних точок для моніторингу (наприклад, з системи відеоспостереження забезпечити повну відсутність сліпих зон), але й забезпечити при цьому різні види інформації з моніторингу об'єкту. І тут йдеться не лише про сенсори диму,

руху, але й потрібна інформація, яка забезпечує автоматичні функції роботи систем та комунікацій будинку. Наприклад, необхідно, щоб у будинку, який знаходиться під охороною, світло в певній кімнаті вмикалось і вимикалось в певний часовий інтервал доби. І при цьому, зрозуміло, щоб наявні сенсори охорони не спрацьовували на хибний сигнал тривоги. Інша ситуація може бути пов'язана з поливом рослин або годуванням через певний електронний механізм домашніх тварин. Вочевидь, у класичній системі безпеки будинку такі додаткові функції забезпечити вкрай важко. Одним із можливих рішень у цьому напрямку може стати використання технологій у рамках концепції «розумного» будинку і IoT.

**Постановка завдання.** LPWAN – це абревіатура для «малопотужної широкосмугової мережі», типу радіотехнології, яка використовується для безпроводового передавання даних у додатках IoT [1]. Це не окрема технологія, а група різних технологій безпроводової мережі. LPWAN можуть використовувати ліцензовані або неліцензовані частоти та включати власні або відкриті стандарти. І тому основним завданням статті можна визначити те, щоб спроектована система безпеки будинку вирізнялась тим, що її елементи повинні відповідати стандартизованим технологіям та рівням концепції Інтернету речей. Додатковою ознакою слід визна-

чити той факт, щоб система охорони забезпечувала б довготривалу автономність роботи її елементів – сенсорів, камер, перемикачів тощо.

**Метою статті** є визначення ключових особливостей, які слід враховувати під час використання технології малої потужності на різних етапах проектування систем безпеки будинків на основі LORA-модулів IoT. Додатково слід відмітити в дослідженні пошук алгоритмів і підходів до створення телекомунікаційної системи на основі технології LPWAN для Інтернету речей.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Є величезна кількість топологій IoT для мереж, основним завданням яких є передавання різного роду інформації. Але найбільш поширеним серед них є сітчаста (mesh) топологія, зіркоподібна топологія та двоточкова топологія. Більшість технологій глобальної мережі з низьким енергоспоживанням (LPWAN) на доповнення до WiFi та стільникових мереж використовують топологію зіркоподібної мережі. Так, мережа типу «зірка» має у своїй архітектурі маршрутизатор або точку доступу в середині топології, яка своєю чергою підключається до всіх терміналів або вузлів мережі (рис. 1).

Як мобільні модулі передавання даних виступають мобільні гаджети, які дозволяють приймати, передавати та накопичувати та відображати

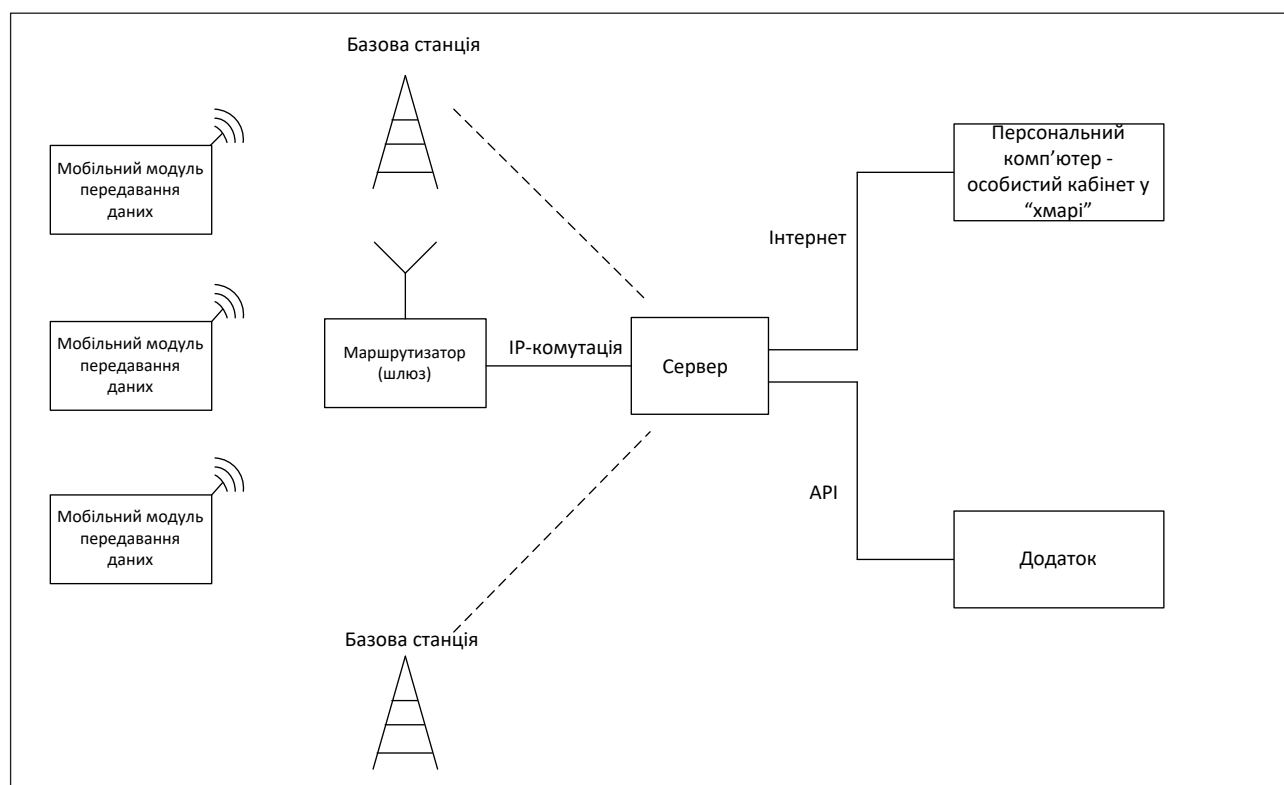


Рис. 1. Топологія мережі LPWAN



інформацію з датчиків, безпроводових відеокамер та сенсорів у комплексі архітектури системи безпеки будинку. У найпростішому випадку це може бути смартфон з відповідним програмним забезпеченням на Android або iOS. У рамках технології LPWAN наведена топологія дозволяє підключення нових кінцевих пристроїв, і їх кількість не визначається рівнем енергоспоживання останніх. Завдяки одноранговому з'єднанню «точка – точка» топологія «зірка» значно простіша і дешевша в реалізації у порівнянні з топологією сітки (mesh). Безпека мережі також зростає, оскільки кінцеві точки працюють незалежно одна від одної. Якщо вузол атакований, інша частина мережі все ще залишається неушкодженою. Крім цього, слід відмітити, що така топологія підключення пристроїв дозволяє розвантажити сервер, адже колізії в цьому разі майже неможливі через особливості роботи базових станцій мережі. Оскільки в цьому разі передбачається активною функція перемикачності частотних каналів у неліцензованому діапазоні частот. Крім цього, аналізуючи топологію на рис. 1, варто відзначити про незалежність роботи особистого кабінету з управління системою, який до того ж знаходиться у хмарному середовищі. Такий підхід значно ускладнює стороннє втручання до роботи системи через те, що дані управління від адміністратора проходять через рівень шифрування, і мережа Інтернет в цьому разі використовується як «транспортний» засіб передавання інформації. Окремо слід відзначити і незалежне розміщення додатку Application (API), який регламентує принципи та підходи підключення нових елементів до мережі на основі технології малої потужності. В цьому разі зміна топології мережі LPWAN через підключення нових елементів до базової станції не передбачає зривання наявних з'єднань або не призводить до перезавантаження всієї системи на основі LPWAN. Такий принцип функціонування дозволяє значно подовжити час автономної роботи сенсорів, датчиків та кінцевих пристроїв системи безпеки будинку, які підключені до мережі LPWAN. Таким чином, мережі типу «зірка» LPWAN оптимізовані для мінімального енергоспоживання і можуть забезпечити тривалий термін служби батареї на стороні датчика. На відміну від топології сітки, вузли не обов'язково повинні бути постійно активними для прослуховування і ретрансляції даних від інших вузлів. Поза часом передавання вони можуть переходити в «сплячий режим» і практично не споживати енергію.

Основним недоліком топології «зірка» є те, що площа мережі обмежена максимальною даль-

ністю передавання між пристроями і шлюзом [2]. Задля визначення особливостей роботи LPWAN розглянемо в рамках дослідження фізичний (PHY) та MAC-рівні елементів за технологією LPWAN.

#### **Фізичний та MAC-рівні LoRa-модулів**

Телекомунікаційна система збору інформації з підтримкою технології LPWAN складається з декількох компонентів, які традиційно можна описати на основі взаємодії різних рівнів роботи. Фізичний (PHY) рівень на рівні підключення апаратури визначає характеристики для передавання даних між елементами мережі. Натомість канальний рівень відповідає за виявлення змін на фізичному рівні і створення протоколу для відправлення даних. Відмітимо, що в основі роботи за технологією LPWAN виділяють поняття LoRa – це запатентований формат модуляції, який належить Semtech. LoRa модулі використовують техніку модуляції «лінійно-частотна модуляція-спектром (CSS)» для формування фізичного (PHY) рівня технологічного стеку (рис. 2). Крім цього, в основі роботи закладено метод розширеного спектра для передавання даних за різними частотним каналам і з різними швидкостями, так що шлюз може адаптуватися до мінливих умов і оптимізувати спосіб обміну даними з кожним пристроєм.

Пристрої LoRa вирізняються такими особливостями, як великий радіус дії, низьке енергоспоживання і безпечна передача даних для додатків IoT. Один шлюз може взаємодіяти з декількома сотнями тисяч пристроїв на відстані до 32 кілометрів на безперешкодному середовищі. Ці технології забезпечують більшу дальність, ніж стільникові мережі, і можуть використовуватися в громадських, приватних або гібридних мережах.

Недоліком є те, що технологія LoRa вибирає неліцензійну смугу частот і загальнодоступний протокол, який створює вразливість у мережі. Зловмисник може прослуховувати адресу легального термінала і генерувати підроблені пакети на шлюз, щоб викликати перевантаження ланки мережі [3]. Загалом же мережа LPWAN, за винятком перевантаженої ланки, все одно залишається працездатною.

Архітектура мережі LoRaWAN складається з кінцевого пристрою (ED), шлюзу (GW), мережного сервера (NS), сервера додатків (AS) і сервера приєднання (JS). Такий варіант архітектури є фактично удосконаленою версією архітектури, яка показана на рис.1 для LPWAN. Так, у цьому разі роль базової станції для підключення елементів до мережі відіграє шлюз доступу. Крім цього, на цьому рівні обладнання змінюються

права відповідальності з функціонування мережі. А це накладає певні особливості з регламентації роботи мережі LoRaWAN, адже рівень доступу через відповідні шлюзи є кінцевим елементом до підключення до мережі Інтернет в рамках IoT. І у разі його несправності може бути повністю відключена можливість віддаленого моніторингу і управління мережею LoRaWAN. Таким чином, повідомлення передаються між кінцевим пристроєм та сервером-шлюзом. Шлюз отримує доступ до мережного сервера через стандартне IP-з'єднання, а кінцевий пристрій обмінюється даними з одним або декількома шлюзами за допомогою однопрохідного LoRa-модуля.

На підставі роботи рівня MAC LoRa в LoRaWAN можна виділити три класи кінцевих пристроїв. Класи допомагають класифікувати пристрої на основі типу з'єднання, яке, по суті, визначає його енергоспоживання і доступність висхідної лінії зв'язку і низхідної лінії зв'язку. Класи визначені за принципом перших літер латинського алфавіту – клас А, клас В і клас С (рис. 2). Ці три різних класи пристроїв призначені для забезпечення різних потреб у широкому діапазоні додатків. Всі три класи підтримують двосторонній зв'язок [4; 5]. Найбільш зручним за енергоефективністю та повною сумісністю з сенсорами IoT є клас А пристроїв. На противагу цьому, клас С пристроїв, навпаки, за умови досягнення максимального рівня прийому даних визначається значним споживанням електроенергії. Зазначимо, що вибір класу пристроїв в LoRaWAN пов'язаний з особливостями з'єднання між пристроями мережі та безпосередньо визначається конфігурацією створеної мережі IoT, інтервалами передавання даних та власне типом цих даних. Так, якщо необхідно передавати зображення з IP-камери в режимі

реального часу в системі безпеки будинку цілодобово, то тут, вочевидь, бажано класифікувати пристрої за класом С. В іншому разі, коли інформація збирається з сенсорів руху в приміщенні IoT-системи будинку, то в межах LoRaWAN такі пристроїв відносять до класу А.

#### *Система охорони житлового будинку на основі LPWAN*

Технологія LPWAN має глибоку проникність для підключення всередині приміщень. Під час використання систем безпеки, обладнаних за технологією LoRa, як запобіжний захід стратегічно розміщуються домофони, камери відеоспостереження, датчики сигналізації дверей і вікон та автоматичні дверні замки (рис. 3). Це дозволяє власнику помешкання захистити себе від потенційних загроз. Вся система може керуватися зі смартфона в будь-який час.

Аналіз архітектури за рис. 3 є практичним відображенням архітектури, яка показана на рис. 1. Так, у цьому разі функції управління системою приймає на себе пост охоронної сигналізації, який може бути реалізований повністю в автономному режимі роботи. Через те, що така архітектура передбачає підключення до мережі Інтернет, то центральна станція моніторингу може бути віддалена на значну відстань від місця знаходження будинку. Крім цього, на основі LoRa-модулів є можливість у розробників виділити центральну станцію моніторингу і мобільний додаток API в окремий модуль. Тим самим, архітектура в частині її управління значно спрощується. Особливо це стосується, коли наведена архітектура може бути реалізована не для однієї системи безпеки будинку, а для декількох окремих приміщень в межах приміського коттеджного містечка. За такої технічної реалізації система управління на

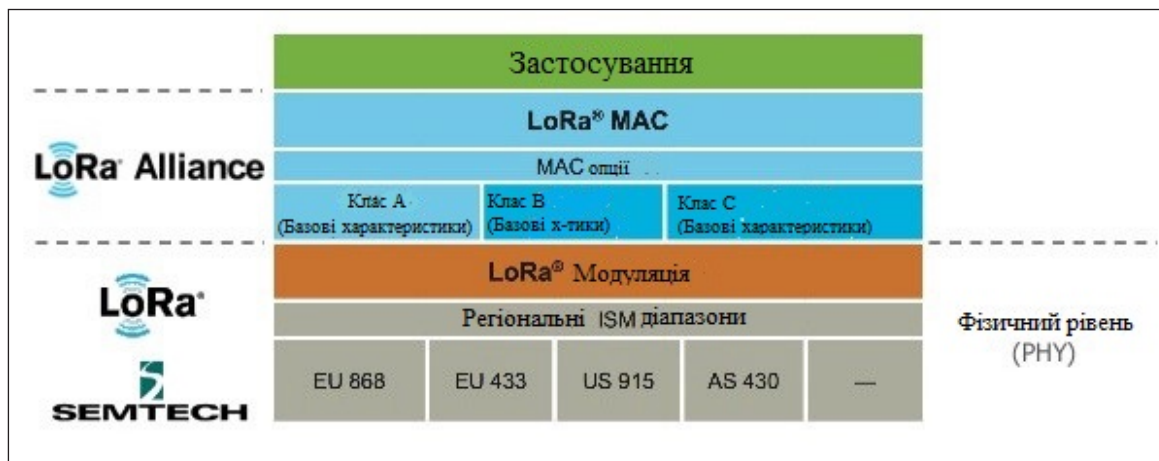


Рис. 2. Типова системна архітектура кінцевого пристрою LoRaWAN

програмному та апаратному рівнях може бути єдиною. Загалом функціонування LoRa-активованої системи безпеки можна поділити на такі частини:

- двері, вікна та датчики руху викликають сигнали тривоги у разі виявлення руху;
- безпроводові сирени і камери безпеки активуються датчиками;
- управління даними здійснюється за допомогою гібридних шлюзів LoRaWAN і Wi-Fi;
- шлюз передає інформацію в хмару або на мережевий сервер, а потім дані обробляються;
- аварійні сигнали активуються на основі оброблених даних;
- смартфони і пристрої отримують оповіщення.

Аналізуючи такий підхід, слід відмітити, що шлюзи доступу в системі можуть бути підключені і до стільникової мережі, а можуть використовуватися і в громадських, приватних або гібридних мережах.

Крім цього, варто відмітити, що передавання інформації через шлюз проходить без аналізу даних. А це своєю чергою може призвести до передавання фішингової інформації, яка значно буде ускладнювати роботу мережного серверу. Через це рекомендується або сервер реалізувати на програмному рівні з функцією аналізу даних та віддаленим розташуванням апаратної частини, або на лінії від передавання даних забезпечити моніторинг інформації перш ніж дані потраплять або у сервер хмарного середовища, або до іншого елемента мережі. Іншим способом захисту мережі та даних, які передаються в системі безпеки, є введення багаторівневого шифрування інформації. Причому в цьому разі необхідно забезпечити захист на основі ключів, які прив'язані до фізичних MAC-адрес кінцевих пристроїв, серверів та

шлюзів доступу. Зрозуміло, що надійність мережі в такому разі значно підвищується, але можуть виникнути труднощі у разі розширення мережі на основі LoRA-модулів. Оскільки в такому разі необхідно мати інструменти додавання елементів та їх злагодженої шифрованої роботи з іншими пристроями мережі.

Нові технології LPWAN працюють на частотах, включених у безлімітні смуги ISM (промислові, наукові, медичні). Тому, на відміну від операторів мобільного зв'язку, операторам мережі LPWAN не доводиться купувати дорогі ліцензії для призначення смуг радіочастотного спектра. LoRaWAN - це специфікація LPWAN, яка дозволяє пристроям на батарейках підключатися до мережі IoT на великі відстані, з низькою пропускну здатністю, в регіональній, національній або глобальній мережі. Мережі LPWAN будуть широко поширені у світі Інтернету речей, особливо там, де потрібна покриття в кілька кілометрів і низьке енергоспоживання.

**Висновки.** Визначено ключові необхідності використання технології малої потужності (LPWA) під час створення мереж на основі Інтернету речей. Зазначено, що основною топологією мережі, де наявна окреслена технологія є топологія зіркоподібної мережі. Такий вибір зумовлений простотою реалізації мережі на основі IoT та економічними розрахунками, пов'язаними з налагодженням та функціонуванням пристроїв мережі. Іншою перевагою такого підходу є критерій мінімального електричного споживання з боку кінцевих пристроїв системи та транзитних елементів.

Проаналізовано фізичний та каналний режими системи пристроїв на основі LPWA. За результатами аналізу виявлено, що LoRa-модулі в рамках LPWAN використовують неліцензійну смугу



Рис. 3. Архітектура безпеки будівлі на основі залучення LoRa-модулів

радіочастот і загальнодоступний протокол, який «створює» можливості до появи вразливості в роботі мережі. Зловмисник може прослуховувати адресу легального терміналу і генерувати підроблені пакети на шлюз, щоб викликати перевантаження. Наведено класифікацію класів кінцевих пристроїв, які працюють у рамках технології LPWAN. Знайдено, що найбільш зручним за енер-

гоефективністю та повною сумісністю з сенсорами IoT є клас А пристроїв. Як практичне спрямування дослідження описано архітектуру безпеки будівлі на основі LoRa-модулів. Ця архітектура вирізняється модульністю підключених пристроїв і може бути розширена шляхом підключення нових IP-камер без перенастроювання зв'язків інших елементів з постом охоронної сигналізації.

#### Список літератури:

1. Ли П. Архитектура интернета вещей. Москва : «ДМК Пресс», 2019. 454 с.
2. McEwen A. Designing the Internet of Things, USA : Publishing NT, 2013. 336 p.
3. Сети LPWAN: история и перспективы. URL: <http://orion-m2m.com/ru/news/seti-lpwan-istoria-i-perspektivy/> (дата звернення: 02.05.2020).
4. Кучерявый А.Е. Самоорганизующиеся сети. Санкт-Петербург : «Любавич», 2011. 312 с.
5. Jerker D. IoT Automation: Arrowhead Framework, Great Britain : CRC Press, 2017. 366 p.

#### **Pereverziev O.A., Humen T.F., Trapezon K.O. RESEARCH OF FEATURES OF USING LPWAN TECHNOLOGY IN MODERN HOUSEHOLD SECURITY SYSTEMS**

*The most common types of topologies of connection of elements in the context of the concept of the Internet of Things are considered. It is proved that the most convenient topology for a network with low power consumption can be considered a topology of the "star" type. This choice is due to the simplicity of the network architecture based on the concept of the Internet of Things and the wide range of opportunities for network modernization, due to the appropriate setup and operation of network devices. Another advantage of this approach is the criterion of minimum electrical consumption of the system. The physical and channel modes of the Low Power Wide Area (LPWA) device system are analyzed. According to the results of the analysis, the LPWA technology according to the adopted protocol uses an unlicensed radio frequency band and a publicly available protocol, which in turn creates opportunities for attempts to externally interfere with the network. An attacker could eavesdrop on the address of a legal terminal and generate fake packets on the gateway to cause network overload. The classification of classes of end devices operating within the framework of LPWAN technology is given. It was found that the most convenient in terms of energy efficiency and full compatibility with IoT sensors is class A devices. An algorithm is proposed according to which separate LoRa-modules of the system can function in order to ensure the principle of minimum electricity consumption.*

*As a practical direction of the study, a variant of the architecture of the building security system based on LoRa-modules is given. This architecture is characterized by the modularity of the connected devices and can be extended by connecting new IP-cameras without reconfiguring the connections of other elements with the security alarm post. The provided recommendations on the architecture of the network in the study can provide in the future with an increased level of reliability of the elements of the security system of a residential building. In general, the study and some of its points can serve as a basis for modernization of existing building security systems, where management and monitoring of the object is implemented on the basis of data collection from control devices and then forwarded to the system security panel.*

**Key words:** class, LPWAN network, PHY level, data transmission, LORA modules, frequency band, power consumption, network architecture, gateway.



# ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.056.5:004.7

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/12>**Бабкін А.А.**

Запорізький національний університет

**Кудін О.В.**

Запорізький національний університет

## ОГЛЯД НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ ВТОРГНЕНЬ

На сучасному етапі розвитку інформаційного суспільства особливо актуальним завданням є забезпечення інформаційної безпеки персональних і корпоративних даних. Захист даних в інтернеті речей і вбудованих системах є темою публікацій останніх років. Одним із аспектів захисту інформації є розроблення спеціалізованого програмного забезпечення, завдання якого полягає у виявленні потенційних загроз із подальшим автоматичним реагуванням або інформуванням користувачів. Прикладом таких програмних засобів є системи виявлення вторгнень, що використовуються для забезпечення захисту комп'ютерних мереж від несанкціонованого доступу. Нині можна виділити такі основні напрями в розробленні подібних систем: підходи на основі певного набору правил; методи автоматизованого виявлення аномалій трафіку. Передбачається, що поведінка зловмисника в комп'ютерній мережі відрізняється від цифрових слідів, які залишає звичайний користувач. Отже, зазвичай завдання виявлення вторгнень зводиться до аналізу мережевого трафіку й розроблення методів розпізнавання. Одним із потужним засобів автоматичного пошуку шаблонів даних є нейронні мережі, які знаходять застосування й у системах виявлення атак. Особливостями роботи таких систем є висока швидкість навчання та адаптивність до нових типів атак. Зазвичай таке програмне забезпечення захисту даних працює в режимі реального часу й аналізує трафік як усередині мережі, так і зовнішні запити. Стаття присвячена аналізу останніх публікацій із побудови нейромережевих моделей у цій галузі. Акцент робиться на роботах, які пропонують методи побудови гібридних систем на основі поєднання нейронних мереж з іншими методами машинного навчання. Саме такі підходи отримали значні результати в комп'ютерній галузі та у сфері машинного перекладу. На основі аналізу попередніх публікацій пропонуються шляхи розвитку систем виявлення атак.

**Ключові слова:** система виявлення вторгнень, нейронна мережа, захист інформації, гібридна система, ансамблеве навчання.

**Постановка проблеми.** Забезпечення захисту інформації є комплексною проблемою, яка включає не тільки технічний аспект, а й правовий, соціальний, культурний тощо. Однак саме розвиток апаратних і програмних засобів несанкціонованого доступу потребує відповідного адаптування технічного інструментарію захисту даних. Так звані системи виявлення вторгнень (англ. Intrusion Detection System, IDS) є досить поширеним засобом захисту інформації користувачів і підприємств. Головною метою таких систем є ідентифікація та фільтрація потенційно шкідливих запитів (атак) у комп'ютерних мережах [1]. Математична

модель цього процесу зводиться до добре відомого завдання розпізнавання образів [2], а саме класифікації або кластеризації даних з метою виявлення аномальних даних у трафіку комп'ютерної мережі. Останнім часом для розв'язання завдання розпізнавання широко застосовуються нейронні мережі [3]. Це пояснюється потенційною здатністю нейромережевих моделей до генералізації, тобто виявлення нових типів атак, однак остаточно це завдання досі не вирішено. Схема застосування нейронних мереж у завданнях захисту даних не відрізняється від загальноприйнятої [3]. До недоліків цього підходу можна зарахувати

необхідність досить великого набору даних для ефективного навчання та вимогливість до ресурсів обчислювальних систем. При цьому висока ефективність подібних систем на основі методів машинного навчання не гарантується. Отже, актуальним завданням є аналітичний огляд наявних публікацій із застосування нейронних мереж у системах виявлення вторгнень з метою виявлення можливих напрямів розвитку технології.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В оглядових статтях [4–10] наводиться класифікація найбільш поширених методів роботи IDS: підходи на основі виявлення сигнатур потенційних атак і на основі пошуку аномалій у даних. У роботі [6] наводиться детальний аналіз переваг і недоліків цих двох методів. Загальним є припущення, що сліди діяльності зловмисника в комп'ютерній мережі відрізняються від стандартної поведінки звичайного користувача.

У роботі [4] проведено класифікацію наявних методів глибинного навчання на генеративні, описові та гібридні. Генеративні методи, наприклад, нейронні мережі автокодувальники, використовуються для абстрактного представлення ознак мережевого запиту або розширення навчальної вибірки. Описові моделі використовуються зазвичай під час навчання з учителем, тобто коли є набір даних, у якому розмічені зловмисні та звичайні запити. Основним інструментом тут є згорткові нейронні мережі та багатошаровий перцептрон. Аналогічний огляд із посиланням на велику кількість статей із різних завдань інформаційної безпеки наведено в роботі [7].

Огляд наявних методів колективного інтелекту (англ. Swarm Intelligence, SI), які полягають у поєднанні великої кількості інтелектуальних агентів у розподілену систему для розв'язання завдань оптимізації, наводиться в праці [5]. Показано, що агенти можуть використовуватися для пошуку правил класифікації мережевих запитів або аномалій, а також наводиться огляд робіт із моделювання гібридних систем колективного інтелекту та штучних нейронних мереж.

Детальна таксономія підходів до розроблення IDS на базі методів машинного навчання наводиться в роботах [6; 9; 10]. Як ознаки для класифікації виділяють у тому числі й джерело даних, яке використовується для виявлення вторгнень: обладнання комп'ютерної мережі або лог-файли користувацької операційної системи. Також наводяться посилання на роботи з використання більшості з відомих алгоритмів машинного навчання, у тому числі різних типів нейронних мереж.

Статті [8; 9] містять огляд публікацій із застосування генетичних алгоритмів і нечіткої логіки під час розроблення систем виявлення атак. Перевагою генетичних алгоритмів є можливість автоматичного пошуку оптимальної комбінації параметрів алгоритму класифікації, наприклад, нейронної мережі, що є важливим етапом розв'язання завдання. Класифікатор із використанням методів нечіткої логіки може генерувати набір правил, що, у свою чергу, можуть аналізуватися спеціалістами з інформаційної безпеки.

Загальною рисою наведених оглядів є досить детальна класифікація методів машинного навчання та посилання на роботи з їх застосування в завданнях виявлення атак. Значно менше уваги приділяється огляду робіт, які поєднують декілька алгоритмів за допомогою методів побудови ансамблів або інших гібридних моделей.

**Постановка завдання.** Стаття присвячена аналізу останніх публікацій із застосування нейронних мереж у розробленні програмних систем виявлення вторгнень. Особлива увага приділяється аналізу робіт з ансамблевого навчання та побудови гібридних систем у цій галузі. На основі проведеного аналізу пропонуються можливі шляхи розвитку.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розроблення програмного забезпечення для запобігання несанкціонованому доступу та захисту даних в інформаційних системах є актуальним завданням сучасної інформатики. Труднощі в розробленні таких програмних засобів пов'язані з необхідністю обробки великої кількості даних про мережеві з'єднання в режимі реального часу, а також із вимогою адаптованості таких систем до нових типів атак (атаки нульового дня).

Нині в науковій літературі запропоновано загальні підходи до розроблення та оцінювання параметрів безпеки нейромережевих моделей захисту інформації [11; 12; 13]. Огляд стандартів мережевої безпеки наведено в праці [14].

Досить велику кількість вітчизняних і зарубіжних робіт присвячено застосуванню нейронних мереж у завданнях виявлення вторгнень [15–37], класифікації шкідливого програмного забезпечення [38] тощо. Особливістю цих робіт є застосування методів машинного навчання та архітектур штучних нейронних мереж, які вже стали класичними в таких застосуваннях, як комп'ютерний зір.

У роботі [15] пропонується використання згорткових нейронних мереж з одновірними шарами для побудови класифікатора мережевих запитів. Виявлено, що на відкритих наборах

даних така модель демонструє вищу точність, ніж моделі на основі багат шарового перцептронну чи рекурентних мереж.

Структурно-логічні моделі виявлення шкідливого програмного забезпечення розглядаються в роботі [16], де запропоновано сигнатурно-кубітні методи синтезу логічних схем.

У праці [17] пропонується архітектура розподіленої хмарної системи виявлення для розумних міст (англ. Smart City), використовуються глибинні нейронні мережі довіри (англ. Deep Belief Network, DBN) і дерева рішень.

У великій кількості робіт застосовуються нейронні мережі-автокодувальники. Наприклад у праці [18] автокодувальник використовується для вилучення інформативних ознак, а як класифікатор виступає багат шаровий перцептрон.

Як і в завданнях комп'ютерного зору, важливим питанням є підготовка наборів даних для тренування нейромережових моделей. Робота [19] пропонує рекурсивний метод знаходження кращого набору ознак, які можна використовувати для класифікації мережових запитів.

Методи нечіткої логіки в поєднанні з нейронними мережами утворюють окремий клас класифікаторів – нечіткі нейромережові моделі. У праці [20] розроблено підхід до класифікації на базі нечітких правил. Завдяки цьому підходу можна отримати набір умов у форматі «Якщо... то...», які є підґрунтям для прийняття рішення нейронною мережею.

У роботах [21; 23] використовуються генеративні змагальні нейронні мережі (англ. Generative adversarial networks, GANs). Систему на основі напівавтоматичного навчання (англ. Semi-supervised learning) із застосуванням генеративних нейронних мереж запропоновано в праці [21]. Ідея підходу полягає в генеруванні додаткових даних, які імітують запити вторгнення. Розподілену систему виявлення атак у мережах інтернету речей (англ. Internet of Things, IoT) розроблено авторами роботи [23]. Особливістю є відсутність необхідності мати спільну базу даних для роботи вузлів системи.

Системи виявлення вторгнень знаходять застосунок не тільки в стандартних комп'ютерних мережах. Так, у праці [24] запропоновано архітектуру рекурентних нейронних мереж для виявлення вторгнень в електронну мережу автомобілів.

Авторами статті [25] розробляється методологія отримання інформації з розрізнених баз даних про проведені атаки. Пропонується метод

знаходження аномалій і розв'язується обернене завдання – визначаються ознаки аномальних запитів. Такий підхід дає експертам змогу отримувати зрозумілий опис вторгнень для подальшого аналізу.

Роботи [26; 30; 31; 33] присвячено аналізу трафіку в комп'ютерних мережах індустріальних підприємств. Випадкові дерева та метод опорних векторів використовуються для аналізу трафіку в мережах автоматизованих систем керування виробництвом [26]. Автори роботи [30] для тієї ж мети застосовують рекурентні нейромоделі. У праці [31] описано сім різних алгоритмів класифікації та особливості протоколів індустріальних мереж.

Ще одним прикладом використання підходів із галузі комп'ютерного зору є використання гібридних систем на базі згорткових мереж у поєднанні з рекурентною архітектурою. У роботі [27] подібна система використовується для багатокласової класифікації.

У роботі [28] для класифікації запитів застосовується глибинна нейронна пряма мережа та метод аналізу головних компонент під час визначення найбільш інформативних ознак. Отже, простір ознак, що використовуються класифікатором, зменшується. Унаслідок цього система може швидше оброблювати дані, що під час аналізу трафіку в реальному часі є суттєвою перевагою.

Також відомим підходом до об'єднання декількох моделей машинного навчання є ітеративне покращення прогнозу на деяких підмножинах вихідних даних. У праці [29] використовується подібна каскадна система двох автокодувальників. Ці методи забезпечують перетворення та стиснення вхідних сигналів.

Рекурентні нейронні мережі застосовано в роботах [32; 34]. Зокрема, автори [34] пропонують гібридну систему, особливістю якої є здатність класифікувати необроблені дані мережового трафіку.

У роботі [35] протестовано застосунок KNIME, за допомогою якого виконано класифікацію різними алгоритмами машинного навчання та проведено порівняння.

Набагато менше робіт присвячено питанню тестування стійкості нейромережових систем виявлення вторгнень до зовнішніх атак. Наприклад, у роботі [37] розглядається випадок змагальних прикладів (англ. Adversarial examples), коли злоумисник намагається переналаштувати нейромережову систему виявлення атак за допомогою штучно згенерованих оманних прикладів даних.

Досить часто під час використання нейромережових моделей, наприклад, у завданнях розпізнавання, автоматичного перекладу, застосовуються різні підходи до поєднання відповідей класифікаторів декількох типів у єдиний результат. Такі підходи мають загальну назву «ансамблеве навчання».

Особливості ансамблювання різних алгоритмів у завданнях виявлення атак розглядаються в роботах [36; 39]. Так, згорткові нейронні мережі в поєднанні з рекурентною та глибинною архітектурою використовуються в праці [36]. Результати цих класифікаторів поєднуються в спільну відповідь за допомогою алгоритму лісу випадкових дерев рішень.

**Висновки.** Отже, особливістю всіх розглянутих вище робіт останніх років є тенденція до побудови гібридних систем та ансамблів, заснованих на поєднанні декількох типів нейронних мереж і/або інших методів машинного навчання. Більшість підходів базується на навчанні з учителем (завдання класифікації) або без учителя (завдання

кластеризації). Також велика увага приділяється попередній підготовці даних для навчання. Тут частіше використовуються автокодувальники або метод головних компонент для зменшення простору ознак і прискорення наступних обчислень.

Перевагами попередніх оглядових робіт є досить детальний опис особливостей систем виявлення вторгнень і базових методів машинного навчання. Водночас майже не приділялася увага методам ансамблювання та побудови гібридних систем, які активно застосовуються в інших застосунках нейронних мереж.

Особливістю цього огляду є акцент на публікаціях із поєднання декількох підходів до побудови систем виявлення мережових атак з метою покращення результуючої точності.

Перспективи подальшого розвитку в цій галузі можуть бути пов'язані з подальшим розвитком гібридних систем і використанням таких підходів, як метанавчання [40], що може зменшити час тренування подібних систем і підвищити здатність до генералізації.

#### Список літератури:

1. Javaid A.Y., Niyaz Q., Sun W., Alam M. A Deep Learning Approach for Network Intrusion Detection System. 2016. URL: <https://doi.org/10.4108/eai.3-12-2015.2262516>.
2. Мазуров В.Д. Математические методы распознавания образов : учебное пособие. 2-е изд. Екатеринбург : Урал. ун-т, 2010. 101 с.
3. Geron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow. Sebastopol : O'Reilly, 2017. 861 p.
4. Azawii A., Al-Janabi S.F.T., Al-Khateeb B. Survey on Intrusion Detection Systems based on Deep Learning. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2019. Vol. 7 (3). P. 1074–1095. URL: <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v7i3.635>.
5. Koliass C., Kambourakis G., Maragoudakis M. Swarm intelligence in intrusion detection: A survey. *Computers & Security The International Source of Innovation for the Information Security and IT Audit Professional*. 2011. P. 625–642. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2011.08.009>.
6. Liu H., Lang B. Machine Learning and Deep Learning Methods for Intrusion Detection Systems: A Survey. *Appl. Sci*. 2019. Vol. 9 (20). 4396 p. URL: <https://doi.org/10.3390/app9204396>.
7. Berman D.S., Buczak A.L., Chavis J.S., Corbett C.L. A Survey of Deep Learning Methods for Cyber Security. *Information*. 2019. № 10. 122 p. URL: <https://doi.org/10.3390/info10040122>.
8. Zamani M., Movahedi M. Machine Learning Techniques for Intrusion Detection. *Arxiv*. 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1312.2177>.
9. Hodo E., Bellekens X., Hamilton A., Tachtatzis C., Atkinson R. Shallow and Deep Networks Intrusion Detection System: A Taxonomy and Survey. *Arxiv*. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1701.02145>.
10. Pande S.D., Khamparia A. A Review on Detection of DDOS Attack Using Machine Learning and Deep Learning Techniques. *Think India journal*. 2019. Vol. 22 (16). P. 2035–2043.
11. Корченко О., Терейковський І., Білощинський А. Методологія розроблення нейромережових засобів інформаційної безпеки інтернет-орієнтованих інформаційних систем. Київ, 2016. 218 с.
12. Терейковський І.А. Нейромережові моделі, методи і засоби оцінювання параметрів безпеки інтернет-орієнтованих інформаційних систем : автореф. дис. ... док. техн. наук. Київ, 2015. 44 с.
13. William S. Network security essentials deep learning approach to network intrusion detection: applications and standards. 4th edition. New Jersey, USA. 2011. 417 p.
14. Комар М.П. Метод построения совокупного классификатора трафика информационно-телекоммуникационных сетей для иерархической классификации компьютерных атак. *Системы обработки информации*. Харків, 2012. № 3. Том 1. С. 134–138.
15. Sriram S., Shashank A., Vinayakumar R., Soman K.P. DCNN-IDS : Deep Convolutional Neural Network based Intrusion Detection System. *TechRxiv, Preprint*. 2020. URL: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.12151734.v1>.



16. Адамов О.С. Моделі і методи захисту кіберпростору на основі аналізу великих даних з використанням машинного навчання : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2019. 29 с.
17. Aloqailya M., Otoum S., Al Ridhawi I., Jararweh Y. An intrusion detection system for connected vehicles in smart cities. *Ad Hoc Networks*. 2019. Vol. 90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2019.02.001>.
18. Zhang C., Ruan F., Yin L., Chen X., Zhai L., Liu F. A Deep Learning Approach for Network Intrusion Detection Based on NSL-KDD Dataset. *IEEE 13th International Conference on Anti-counterfeiting, Security, and Identification (ASID)*. 2019. P. 41–45. URL: <https://doi.org/10.1109/ICASID.2019.8925239>.
19. Mashayak S.A., Bombade B.R. Network Intrusion Detection Exploitation Machine Learning Strategies with the Utilization of Feature Elimination Mechanism. *International journal of computer sciences and engineering*. 2019. Vol. 7(5). P. 1292–1300. URL: <https://doi.org/10.26438/ijcse/v7i5.12921300>.
20. Almseidin M., Kovacs S. Intrusion Detection Mechanism Using Fuzzy Rule Interpolation. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1904.08790>.
21. Mohammadi B., Sabokrou M. End-to-End Adversarial Learning for Intrusion Detection in Computer Networks. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1904.11577>.
22. Suman C., Tripathy S., Saha S.. Building an Effective Intrusion Detection System using Unsupervised Feature Selection in Multi-objective Optimization Framework. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.06562>.
23. Ferdowsi A., Saad W. Generative Adversarial Networks for Distributed Intrusion Detection in the Internet of Things. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1906.00567>.
24. Hanselmann M., Strauss T., Dormann K., Ulmer H. CANet: An Unsupervised Intrusion Detection System for High Dimensional CAN Bus Data. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1906.02492>.
25. Camacho J., García-Giménez J.M., Fuentes-García N.M., Maciá-Fernández G. Multivariate Big Data Analysis for Intrusion Detection: 5 steps from the haystack to the needle. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1906.11976>.
26. Anton S.D.D., Sinha S., Schotten H.D. Anomaly-based Intrusion Detection in Industrial Data with SVM and Random Forests. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1907.10374>.
27. Wu P., Guo H. LuNet: A Deep Neural Network for Network Intrusion Detection. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1909.10031>.
28. Rawat S., Srinivasan A., Vinayakumar R. Intrusion detection systems using classical machine learning techniques versus integrated unsupervised feature learning and deep neural network. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1910.01114>.
29. Gharib M., Mohammadi B., Dastgerdi S.H., Sabokrou M. AutoIDS: Auto-encoder Based Method for Intrusion Detection System. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1911.03306>.
30. Zizzo G., Hankin C., Maffei S., Jones K. Intrusion Detection for Industrial Control Systems: Evaluation Analysis and Adversarial Attacks. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1911.04278>.
31. Zolanvari M., Teixeira M.A., Gupta L., Khan K.M., Jain R. Machine Learning-Based Network Vulnerability Analysis of Industrial Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6 (4). P. 6822–6834. URL: [10.1109/JIOT.2019.2912022](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2912022).
32. Gwon H., Lee C., Keum R., Choi H. Network Intrusion Detection based on LSTM and Feature Embedding. *Arxiv*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1911.11552>.
33. Li G., Shen Y., Zhao P., Lu X., Liu J., Liu Y., Hoi S.C. H. Detecting cyberattacks in industrial control systems using online learning algorithms. *Neurocomputing*. 2019. Vol. 364. P. 338–348. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.07.031>.
34. Soltani M., Siavoshani M.J., Jahangir A.H. A Content-Based Deep Intrusion Detection System. *Arxiv*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2001.05009>.
35. Abualkibash M. Machine Learning In Network Security Using Knime Analytics. *International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA)*. 2019. Vol. 11 (5). URL: [10.5121/ijnsa.2019.11501](https://doi.org/10.5121/ijnsa.2019.11501).
36. Andalib A., Vakili V.T. An Autonomous Intrusion Detection System Using Ensemble of Advanced Learners. *Arxiv*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2001.11936>.
37. Alhajjar E., Maxwell P., Bastian N.D. Adversarial Machine Learning in Network Intrusion Detection Systems. *Arxiv*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.11898>.
38. Терейковська Л.О., Іванченко Є.В., Погорелов В.В. Метод адаптації глибокої нейронної мережі до розпізнавання комп'ютерних вірусів. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. Луцьк, 2019. № 35. С. 198–205.
39. Ludwig S.A. Applying a neural network ensemble to intrusion detection. *Journal of artificial intelligence and soft computing research*. 2019. Vol 9. P. 177–188. URL: <https://doi.org/10.2478/jaiscr-2019-0002>.
40. Geng X., Chen X., Zhu K.Q. MICK: A Meta-Learning Framework for Few-shot Relation Classification with Little Training Data. *Arxiv*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.14164>.

**Babkin A.A., Kudin O.V. AN OVERVIEW OF NEURAL NET MODELS FOR INTRUSION DETECTION SYSTEM**

*The problem of information security is significant in the modern information society. Data protection on the Internet of Things and embedded systems has been the subject of recent publications. Personal and corporate data are potential vulnerabilities. Therefore, specialized software is needed to detect security threats and then automatically respond or inform users. The main purpose of such software is to identify threats in the real time network traffic. Intrusion detection systems are great example of such software. The aim is to detect potential attacks in computer networks. There are two main methods here: signature-based detection and anomaly-based detection. It is assumed that the behavior of an attacker on a computer network is different from the digital traces left by the regular user. Therefore, the problem of intrusion detection is usually reduced to the analysis of network traffic and the development of recognition methods. Anomaly-based approach requires some kind of machine learning methods for automatic anomaly detection and different types of neural networks are quite useful here. Features of such intrusion detection system are high learning speed and adaptability to new types of attacks. Typically, this data protection software works in real time and analyzes traffic both inner and external network requests. This paper discusses the models and methods of machine learning that are employed to solve the problem of automatic intrusion detection. We focus on works that offer methods for building hybrid systems based on a combination of neural networks with other machine learning methods. Such approaches have yielded significant results in the field of computer vision and machine translation. In addition, we outline a direction for further development of such models.*

**Key words:** *Intrusion detection system, Neural Networks, Information Security, Hybrid System, Ensemble Learning.*

**Боділовський О.К.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИБІР ОБЛАСТІ ІНТЕРЕСУ В РАЗІ БЕЗКОНТАКТНОГО МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ДИХАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ СЕМАНТИЧНОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ

У статті запропоновано метод вибору області інтересу при безконтактному моніторингу дихання за допомогою камери. Запропонований метод базується на використанні семантичної сегментації тіла людини з метою визначення ділянки, яка опосередковано бере участь у диханні. Метод полягає в автоматичному визначенні ділянки торсу людини в кадрі та отриманні кривої дихання за допомогою методу оптичного потоку. Отриманий сигнал не міститиме сторонніх рухів об'єктів фону, які могли спотворювати якість моніторингу дихання. Для визначення області інтересу використовувався модель, що дає змогу локалізувати характерні ділянки тіла людини (ділянка голови, торсу, плечей, передпліч тощо) для кадрів відеопослідовності. У подальшому сегментований кадр використовувався під час визначення області інтересу, для якої проводилася оцінювання оптичного потоку. Отримана в результаті крива оптичного потоку відображає характеристики дихання людини в часовій області. Запропонований алгоритм дає змогу, зокрема, оцінити частоту дихання, а також складніші параметри дихання, що мають діагностичну цінність під час моніторингу стану пацієнта. Продемонстровано отримання кривої дихання з відеозапису з вибором області інтересу за допомогою семантичної сегментації. Розрахована за допомогою алгоритму крива дихання не має в складі складників, пов'язаних зі стороннім рухом, наявним у кадрах на відеозаписі, а містить складники, пов'язані з дихальними рухами об'єкта. Перевагою цього методу є те, що можна оцінити розташування об'єкта дослідження в кадрі та використовувати інформацію про розташування інших частин тіла з метою покращення якості аналізу. Недоліком використаної моделі є неможливість її використання в мобільних пристроях і в пристроях, що не мають у складі потужних графічних процесорів. Тому актуальним завданням для цього алгоритму є використання моделей, що можуть бути запуснені на мобільному пристрої та дозволятимуть моніторинг дихання пацієнта в режимі реального часу. Цей метод може застосовуватися в безконтактних системах моніторингу дихання в медичних закладах, домашньому моніторингу, на транспорті тощо.

**Ключові слова:** безконтактний моніторинг дихання, семантична сегментація, параметри дихання, вибір області інтересу, оптичний потік.

**Постановка проблеми.** Моніторинг дихання є важливим аспектом у задачах усунення артефактів руху при комп'ютерній томографії [1], магнітно-резонансній томографії [2], променевій терапії [3], у неонатальних застосуваннях [4], у приладах моніторингу стану людей похилого віку [5], а також у приладах моніторингу для автомобільної, залізничної та авіаційної галузі, контролю на транспорті. Останнім часом до безконтактних методів прикута все більша увага у зв'язку з посиленням заходів безпеки при пандеміях, зокрема, для виявлення хворих в аеропортах, вокзалах тощо [6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значні зусилля спрямовані на проектування безконтактних систем моніторингу дихання в реальному часі. Відсутність прямого контакту між пацієнтом і пристроєм контролю не завдає дис-

комfortу й розширює сфери можливого застосування. Є багато підходів до безконтактного моніторингу дихання, таких як ультразвуковий метод, радарний метод, метод на основі ємнісної ЕКГ тощо. Але найбільш перспективними вважаються методи, засновані на аналізі відеозображення пацієнта, яке може бути отримане за допомогою камер, що пов'язано з широкою доступністю камер, їх низькою вартістю й задовільною якістю отриманого відеосигналу. Для підвищення точності моніторингу параметрів дихання важливим завданням є визначення області інтересу на відео, у якій будуть наявні лише ті ділянки тіла, що рухаються в процесі дихання, а також ця ділянка кадру має бути вільна від артефактів. У роботі запропоновано метод визначення області інтересу з використанням семантичної сегментації, яка знайшла широке застосування в області

комп'ютерного зору, починаючи від сегментації в мікроскопії й закінчуючи автономними автомобілями, та обґрунтовано її застосування.

**Постановка завдання.** Метою статті є розгляд методу вибору області інтересу при безконтактному моніторингу дихання за допомогою камери.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

### 1. Метод вибору області інтересу при безконтактному моніторингу дихання

При безконтактному моніторингу дихання за допомогою камери та на основі оптичного потоку визначним фактором точності методу є вибір ділянки кадру для моніторингу та відсутність різноманітних артефактів і завад, адже необхідно відслідковувати майже непомітні неозброєним оком коливання груднини. Сьогодні більшість підходів на безконтактного моніторингу дихання за допомогою однієї відеокамери, які описані в публікаціях [7–10], мають такий алгоритм: визначення області інтересу, що може бути виконана за рахунок установлення камери, та об'єктива на відстані, при якій у кадр потраплятиме лише область інтересу (грудина), ручне виділення області інтересу з подальшим її аналізом, а можливо, й автоматичним відстеженням, також застосовують різноманітні підходи для вибору характерних точок як підсилення відео на основі методу Ейлера (Eulerian Video Magnification) [11]. Після вибору області інтересу застосовують метод оптичного потоку [12] для визначення швидкості руху пікселів у часі між кадрами відеопослідовності. Так отримується крива, яка відповідає швидкості руху характерних точок в області інтересу, що корелює з дихальними рухами груднини людини. У подальшому отриманий сигнал обробляють з метою знаходження частоти дихання, застосовуючи або підходи в частотній області з метою визначення основної частоти, або аналіз у часовій області з метою визначення піків дихальної кривої й розрахунку частоти коливань. Зазвичай аналіз проводять із застосуванням фільтрації або методу головних компонент PCA [13].

Розглянемо переваги та недоліки описаних вище підходів до вибору області інтересу. Мето-

дика налаштування камери так, щоб у кадр потрапила лише область інтересу, має незаперечну перевагу через відсутність можливих артефактів, спричинених потраплянням у кадр сторонніх об'єктів на фоні, що може спотворити результати аналізу. Тому такий метод може мати обмежену функціональність і застосований лише для пацієнтів, що перебувають нерухомо на лікарняному ліжку, або ж до немовлят, які перебувають в інкубаторному боксі. На відміну від попереднього підходу, ручний вибір області інтересу позбавлений недоліку встановлення камери лише певним чином, а може бути використаний під час моніторингу за допомогою багатьох відеокамер, включаючи веб-камери, а також камери, що встановлені в мобільні телефони чи ноутбуки. Ручний метод можна зробити напівавтоматичним, додавши до алгоритму трекінг, коли оператор вказує вручну область моніторингу, а надалі алгоритм буде «супроводжувати» цю область від кадру до кадру на відео за певними ознаками (колір, структура, характерні точки тощо). Недоліком напівавтоматичного методу можна вважати необхідність оператору вказати область інтересу на початку моніторингу, а також ненадійність методів трекінгу, які можуть «губити» область інтересу, що знову ж таки потребуватиме залучення оператора.

Основними вимогами до вибору області інтересу є точне виділення ділянки тіла людини, яка виконує дихальні рухи. Область торсу має найбільший інтерес під час моніторингу параметрів дихання, адже дихальні найбільш помітні саме в цій області. Залежно від типу дихання, черевного (коли задіяні більшою мірою м'язи діафрагми та живота) або грудного (задіяні м'язи груднини та діафрагми), найбільш амплітудні рухи зосереджені в ділянці торсу. Також важливою є розроблення автоматичного методу вибору області інтересу, щоб виключити необхідність участі оператора в процесі моніторингу.

У роботі пропонується використання семантичної сегментації для визначення області інтересу. Це дасть змогу уникнути недоліків, пов'язаних із

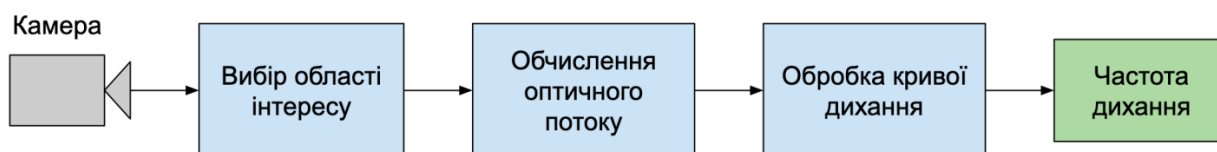


Рис. 1. Схема алгоритму безконтактного моніторингу дихання



наявними методами вибору області інтересу при безконтактному моніторингу параметрів дихання.

## 2. Семантична сегментація

Сегментація зображень – це сукупність методів комп'ютерного зору, що мають на меті розбиття зображення на сукупності пікселів, які відповідають одному об'єкту чи його частині. У свою чергу, семантична сегментація присвоює кожному пікселю зображення мітку, яка вказує на належність до певного класу. На рис. 2 зображено приклад семантичної сегментації, де групи пікселів, що відповідають за силуети автомобілів, людей, дороги, тротуару тощо, присвоєно відповідному класу та зафарбовано відповідним для кожного класу кольором.

Методи сегментації мають тривалу історію, їх умовно можна розділити на класичні або традиційні, методи сегментації за допомогою глибоких нейронних мереж. До традиційних можна зарахувати сегментацію за кольором пікселів зображення, а також сегментацію за допомогою підходів, що засновані на виділенні різноманітних властивостей об'єктів на зображенні за допомогою harris corners [15], histogram of oriented gradients (HOG) [16], дескрипторів scale-invariant feature transform (SIFT) [17], Speeded-Up Robust Features (SURF) [18] тощо, а також підходів, Bag-of-visual-words (BOV) [19], Textons [20] тощо. На цьому етапі розвитку алгоритмів сегментації традиційні методи вже давно програють у якості алгоритмам на основі нейронних мереж.

Напрямок методів семантичної сегментації на основі глибоких нейронних мереж також має кілька підходів, які можна розділити так [21]:

1. Повнозв'язкові згорткові нейронні мережі (Fully convolutional networks).

2. Згорткові нейронні мережі з графічними моделями (Convolutional models with graphical models).

3. Мережі на основі енкодер-декодер архітектури (Encoder-decoder based models).

4. Багатомасштабні та пірамідальні мережі (Multi-scale and pyramid network based models).

5. Мережі, засновані на R-CNN архітектурі (для інстанс сегментації).

6. Моделі, засновані на розріджених згортках (dilated convolution), а також сімейство моделей DeepLab.

7. Моделі, засновані на рекурентних нейронних мережах.

8. Моделі з використанням уваги (Attention-based).

9. Генеративні змагальні мережі.

10. Згорткові моделі з використанням активного контуру (Convolutional models with active contour models).

11. Інші моделі.

Для тренування нейронних мереж і порівняння різноманітних алгоритмів і підходів використовують стандартизовані набори даних: PASCAL VOC [22], MS COCO [23], ADE20k [24; 25], Cityscapes [14] тощо, а також стандартизовані метрики якості роботи алгоритмів, такі як піксельна точ-



Рис. 2. Приклад результату семантичної сегментації зображення з набору даних Cityscapes [14]

ність (Pixel accuracy) або середня піксельна точність (mPA), коефіцієнт Жаккара (Intersection over Union(IoU)) або його середнє значення для кожного класу (mean-IoU), F1-коефіцієнт, DICE коефіцієнт тощо.

Як приклад наведено таблицю порівняння методів сегментації за метрикою mean-IoU для набору даних PASCAL VOC 2012 test [22].

### 3. Вибір області інтересу за допомогою семантичної сегментації

Пропонується використовувати вже наявний набір даних Pascal-Person-Part [27]. Цей набір даних побудований на основі вже наявного набору PASCAL VOC, до якого додані нові файли розмітки, що дають можливість натренувати модель на сегментацію семи класів: голова, плече, передпліччя, торс, верхня частина ніг, нижня частина ніг, а також фон. Цей набір класів дає змогу з високою точністю й автоматично визначати область інтересу для моніторингу параметрів дихання залежно від обраної моделі та наявних обчис-

лювальних ресурсів, уточнювати область інтересу в кожному кадрі або ж раз на декілька кадрів, а також цей підхід дає можливість усунути артефакти, пов'язані з перекриттям області інтересу кінцівками пацієнта.

Для проведення експерименту використану модель, представлену в роботі [28]. Модель має архітектуру під назвою Augmented Context Embedding with Edge Perceiving (A-CE2P). На рисунку 3б наведено результат вибору області інтересу порівняно з ручним методом вибору (рисунк 3а). Як видно з рисунка, в область інтересу, обрану вручну, потрапляє рука об'єкта дослідження, що може вплинути на якість аналізу параметрів дихання через артефакти руху, тоді як область інтересу, обрана за допомогою сегментації, включає лише торс людини (зелений колір), що дає змогу більш точно отримати криву дихання.

У роботі використана модель [28] з метою визначення області інтересу з подальшим

Таблиця 1

#### Методи семантичної сегментації та їх ефективність [26]

RANK	METHOD	MEAN IOU	EXTRA TRAINING DATA	PAPER TITLE	YEAR
1	DeepLabv3+ (Xception-65-JFT)	89.0%	✓	Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation	2018
2	ExFuse (ResNeXt-131)	87.9%	✓	ExFuse: Enhancing Feature Fusion for Semantic Segmentation	2018
3	DPC	87.9%	✓	Searching for Efficient Multi-Scale Architectures for Dense Image Prediction	2018
4	CFNet (ResNet-101)	87.2%	✓	Co-Occurrent Features in Semantic Segmentation	2019
5	DeepLabv3-JFT	86.9%	✓	Rethinking Atrous Convolution for Semantic Image Segmentation	2017
6	DCNAS	86.9%	×	DCNAS: Densely Connected Neural Architecture Search for Semantic Image Segmentation	2020
7	Smooth Network with Channel Attention Block	86.2%	×	Learning a Discriminative Feature Network for Semantic Segmentation	2018
8	SANet (pretraining on COCO dataset)	86.1%	✓	Squeeze-and-Attention Networks for Semantic Segmentation	2019
9	EncNet	85.9%	✓	Context Encoding for Semantic Segmentation	2018
10	PSPNet	85.4%	✓	Pyramid Scene Parsing Network	2016

аналізом параметрів дихання, що оцінені на основі запропонованої моделлю області. На рисунку 4 наведено приклад кривої дихання, що оцінена з області інтересу.

Використана для вибору області інтересу модель має недолік, через те що на визначення області інтересу потрібні значні обчислювальні ресурси й у реальному часі робота цієї моделі можлива лише за наявності потужного графіч-

ного прискорювача. Щоб уможливити аналіз з автоматичним вибором області інтересу на основі семантичної сегментації в реальному часі, необхідно використати інші архітектури нейронних мереж, а також адаптувати їх до роботи на мобільних пристроях. Це дасть змогу виконувати точніший моніторинг параметрів дихання на більшій кількості розповсюджених пристроїв.

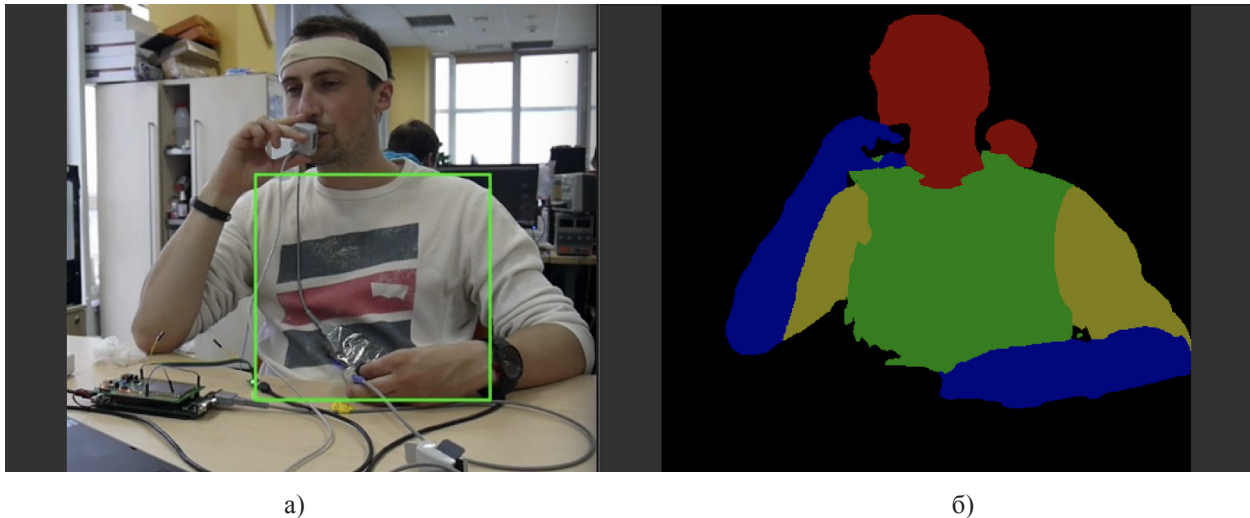


Рис. 3. Порівняння вручну обраної області інтересу та області, отриманої за допомогою семантичної сегментації

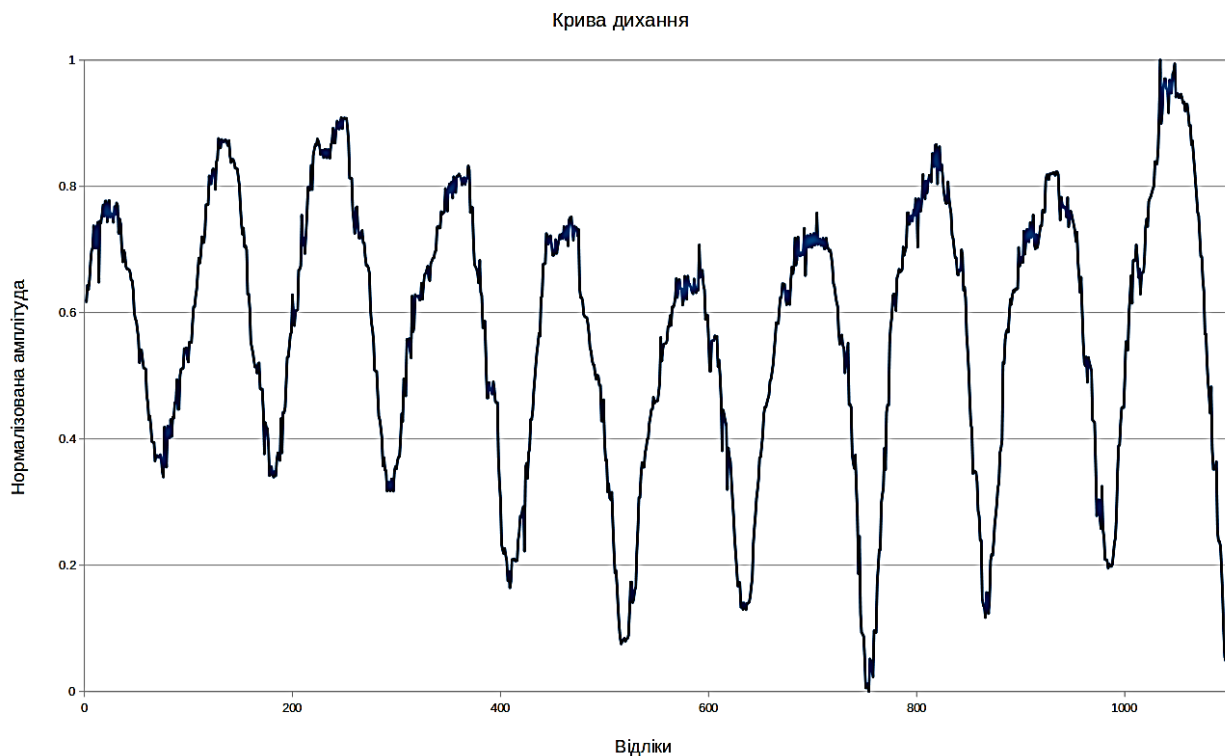


Рис. 4. Приклад кривої дихання з області інтересу, визначеної за допомогою семантичної сегментації

**Висновки.** У роботі запропоновано підхід до автоматичного вибору області інтересу при безконтактному моніторингу параметрів дихання за допомогою камери на основі семантичної сегментації тіла людини. Продемонстровано використання нейронної мережі для визначення області інтересу, а також отримано криву дихання, що обчислена на основі аналізу відео із цієї області.

Визначено основний недолік нейронної мережі, яка використовувалася для сегментації, а саме обмеження використання її в реальному часі на пристроях без потужного графічного прискорювача. Для цього вже розпочато роботу над створенням моделі, що не матиме цього недоліку й працюватиме на мобільному пристрої або ноутбуку з прийнятною точністю.

#### Список літератури:

1. Jones K.R. A respiration monitor for use with CT body scanning and other imaging techniques. *Br. J. Radiol.* 1982. Vol. 55. № 655. P. 530–533.
2. Magnetic resonance imaging with respiratory gating: techniques and advantages / R. Ehman, M. McNamara, M. Pallack, H. Hricak, and C. Higgins. *Am. J. Roentgenol.* 1984. Vol. 143. № 6. P. 1175–1182.
3. Li T., Geng J., Li S. Automatic respiration tracking for radiotherapy using optical 3D camera. 2013. P. 861804–861804.
4. Neonatal Non-contact Respiratory Monitoring based on Real-time Infrared Thermography / A.K. Abbas, K. Heimann, K. Jergus, T. Orlikowsky, S. Leonhardt. *Biomed. Eng. OnLin.* 2011. Vol. 10. № 1. P. 93.
5. Aoki H., Koshiji K. Non-contact Respiration Monitoring Method for Screening Sleep Respiratory Disturbance Using Slit Light Pattern Projection,” in *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006*. R. Magjarevic and J. H. Nagel, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2007. P. 680–683.
6. Abnormal respiratory patterns classifier may contribute to large-scale screening of people infected with COVID-19 in an accurate and unobtrusive manner / Y. Wang, M. Hu, Q. Li, X.-P. Zhang, G. Zhai, N. Yao. *ArXiv200205534 Cs Eess*, Feb. 2020, Accessed: Mar. 23, 2020. URL: <http://arxiv.org/abs/2002.05534>.
7. Nakajima K., Osa A., Miike H. A method for measuring respiration and physical activity in bed by optical flow analysis. *Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1997. 1997. Vol. 5. P. 2054–2057.
8. Nakajima K., Matsumoto Y., Tamura T. Development of real-time image sequence analysis for evaluating posture change and respiratory rate of a subject in bed. *Physiol. Meas.* 2001. Vol. 22. № 3. № 21.
9. Kuo Y.-M., Lee J.-S., Chung P. A Visual Context-Awareness-Based Sleeping-Respiration Measurement System. *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.* 2010. Vol. 14. № 2. P. 255–265..
10. Real-time vision based respiration monitoring system / K.S. Tan, R. Saatchi, H. Elphick, D. Burke. *2010 7th International Symposium on Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. 2010. P. 770–774.
11. Eulerian video magnification and analysis / N. Wadhwa et al. *Commun. ACM*. 2016. Vol. 60. № 1. P. 87–95.
12. Horn B.K.P., Schunck B.G. Determining optical flow. *Artif. Intell.* 1981. Vol. 17. № 1–3. P. 185–203.
13. Wold S., Esbensen K., Geladi P. Principal component analysis. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 1987. Vol. 2. № 1. P. 37–52.
14. The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding / M. Cordts et al. presented at the Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016, P. 3213–3223.. URL: [http://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2016/html/Cordts\\_The\\_Cityscapes\\_Dataset\\_CVPR\\_2016\\_paper.html](http://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2016/html/Cordts_The_Cityscapes_Dataset_CVPR_2016_paper.html) (accessed: May 15, 2020).
15. Konstantinos G. Derpanis. The harris corner detector. York University, Oct. 2004. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.482.1724&rep=rep1&type=pdf> (accessed: May 15, 2020).
16. Dalal N., Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. Jun. 2005. Vol. 1. P. 886–893.
17. Lowe D.G. Object recognition from local scale-invariant features. *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. Sep. 1999. Vol. 2. P. 1150–1157.
18. Speeded-Up Robust Features (SURF) / H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, and L. Van Gool. *Comput. Vis. Image Underst.* 2008. Vol. 110. № 3. P. 346–359.
19. Visual Categorization with Bags of Keypoints / G. Csurka, C. R. Dance, L. Fan, J. Willamowski, C. Bray. P. 16.
20. What are Textons? / S.-C. Zhu, C. Guo, Y. Wang, and Z. Xu. *Int. J. Comput. Vis.* 2005. Vol. 62. № 1. P. 121–143, Apr. 2005.
21. [2001.05566] Image Segmentation Using Deep Learning: A Survey. URL: <https://arxiv.org/abs/2001.05566> (accessed: May 15, 2020).
22. The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge / International Journal of Computer Vision. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1007/s11263-009-0275-4> (accessed: May 15, 2020).



23. Microsoft COCO: Common Objects in Context / T.-Y. Lin et al. *Computer Vision – ECCV 2014*. Cham, 2014. P. 740–755.
24. Scene Parsing through ADE20K Dataset / B. Zhou, H. Zhao, X. Puig, S. Fidler, A. Barriuso, A. Torralba. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2017.
25. Semantic understanding of scenes through the ade20k dataset / B. Zhou, H. Zhao, X. Puig, S. Fidler, A. Barriuso, A. Torralba. *ArXiv Prepr. ArXiv160805442*, 2016.
26. Papers with Code – PASCAL VOC 2012 test Leaderboard. URL: <https://paperswithcode.com/sota/semantic-segmentation-on-pascal-voc-2012> (accessed: May 15, 2020).
27. Detect What You Can: Detecting and Representing Objects Using Holistic Models and Body Parts / X. Chen, R. Mottaghi, X. Liu, S. Fidler, R. Urtasun, A. Yuille. *2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Jun. 2014. P. 1979–1986.
28. Self-Correction for Human Parsing / P. Li, Y. Xu, Y. Wei, Y. Yang. *ArXiv191009777 Cs Eess*. Oct. 2019. URL: <http://arxiv.org/abs/1910.09777> (accessed: May 15, 2020).

#### **Bodilovskyi O.K. SELECTION OF REGION OF INTEREST IN NON-CONTACT MONITORING OF RESPIRATION PARAMETERS USING SEMANTIC SEGMENTATION**

*The article proposes a method for selection of the region of interest in camera-based non-contact respiration monitoring solutions. The proposed method is based on the semantic segmentation of the human body and performs a selection of the area that is corresponded to respiration movements. The method is automatically determining the area of the human torso in the frame and obtaining the respiration curve using the optical flow method. The received signal will not contain artifact movements of background objects that could decrease the quality of respiratory monitoring. A model was used for localization of the human body parts (head, torso, shoulders, forearms, etc.) in the video. After that the segmented frame was used to selection of the region of interest for the optical flow evaluation. The resulting optical flow curve reflects the characteristics of human respiration in the time domain. The proposed algorithm allows us to estimate the respiratory rate, as well as more complex respiratory parameters that have diagnostic value for the patient's monitoring. The article demonstrated an estimation of the respiration curve from a video with a region of interest selection using semantic segmentation. The curve estimated using an algorithm does not include components related to artifacts movements that were presented in the frames but contain components related to the respiratory movements of the object. The advantage of this method is the assessment of the object location in the frame as well as other parts of the body to improve the quality of the respiratory analysis. The disadvantage of this model is low performance in mobile devices and devices that do not include powerful GPUs. Therefore, an important task for this algorithm is improvements of the model performance that allow us to run the model on a mobile device and perform real-time monitoring of the patient's respiration. This method can be used in non-contact respiration monitoring systems in hospitals, for home monitoring, for respiration monitoring on public transportation, etc.*

**Key words:** non-contact respiration monitoring, semantic segmentation, respiration parameters, region of interest selection, optical flow.

**Власенко О.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Єфремов Ю.М.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Оринчак І.А.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ШТУЧНИЙ РОЗУМ І ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ, ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЗАДАЧІ

*У статті розглянуто такі популярні нині поняття, як «штучний розум» і «штучний інтелект». Ці поняття можуть визначатися досить різнопланово, з урахуванням різних індивідуальних особливостей, а саме в царині пізнання, мислення, сприйняття, прийняття рішення. Як самостійний науковий напрям штучний інтелект існує з 40-х років ХХ століття. Доволі поширена думка, що саме дослідження в цьому напрямі будуть визначати основний вектор розвитку інформаційного суспільства. Використання штучного розуму в різних сферах діяльності людини значно спрощує роботу в тих галузях життєдіяльності людини, де вагомий вплив здійснюють природні умови, екологія та інші негативні фактори. Обґрунтовано, що під штучним розумом мається на увазі теорія створення програмних та апаратних засобів, здатних усвідомлено сприйняти довкілля як середовище життєдіяльності, усвідомлювати й пізнавати його закони, моделювати процеси цього середовища, а також створення самих програмно-апаратних засобів, що виконують взаємодію з навколишнім світом. Практичне застосування інтелектуальних систем розпочалося з розроблення програм для розв'язку математичних завдань, доведення теорем, шахових ігор. У роботі наведена класифікація реакцій систем штучного розуму зі штучним інтелектом по групах. Описано схематичний і математичний вигляд реакції таких систем. Розглянуто найпростіший приклад – «пошук виходу з лабіринту», системи штучного інтелекту з використанням різних залежно від класифікації реакцій з подальшою оцінкою їх ефективності. Нині багато первинних ідей штучного інтелекту реалізовано в спеціальних технологіях, які ввійшли в наше повсякденне життя і сприймаються як належне. Але яким би потужним не був штучний розум, він усе одно великою мірою буде залишатися залежним від засобів і методів взаємодії його з навколишнім світом.*

**Ключові слова:** розум, знання, інтелект, мислення, інтерпретація, схематичне зображення, математична модель.

**Постановка проблеми.** Автоматизація та комп'ютеризація в сучасному житті відбуваються надзвичайно стрімко. Кількість людей, які працюють в інформаційній галузі, постійно збільшується, але, незважаючи на це, автоматизація й комп'ютеризація цієї сфери певною мірою відстає від виробничої галузі. У наш час людині вже мало того, що комп'ютери й комп'ютерні системи можуть виконувати складні розрахункові та управлінські завдання, їй потрібний помічник – для швидкої інтерпретації, семантичного аналізу величезного обсягу інформації. Помічником для вирішення таких завдань може стати штучний розум (ШР) і штучний інтелект (ШІ).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Поява сучасних потужних комп'ютерів зумовила питання, пов'язані зі створенням штучного

розуму і штучного інтелекту. Якими вони можуть бути? Подібними до розуму людини чи автомата з розумною поведінкою іншої якості [1; 2; 5–8; 10; 11]? Під час проектування систем зі штучним розумом виникає проблема їх представлення. Якщо на основі комп'ютерних систем, чи буде поведінка системи штучний розум комп'ютера подібною до природного (людського) розуму за формою сприйняття й осмислення реального світу. Як будуть представлені знання в таких системах тощо?

**Постановка завдання.** Метою досліджень є штучний розум і штучний інтелект, класифікація та дослідження типів поведінки систем зі штучним розумом і способи схематичного й математичного опису цих моделей; порівняння та проблематика отриманих результатів залежно

від способу поведінки систем штучного розуму зі штучним інтелектом.

#### Виклад основного матеріалу дослідження.

Дослідження й пошук можливих шляхів створення штучного розуму та штучного інтелекту ведуться досить тривалий час. Натепер уже багатьма філософами й ученими сформульовано загальні принципи бачення проблем цього напрямку, а також робляться спроби побудови моделей таких систем [7]. Чимало говориться й про роль можливих сфер застосування. Ми, зі свого боку, також хочемо представити своє бачення побудови та функціонування моделі такої системи.

Під час описування моделі штучного розуму з механізмами штучного інтелекту ми будемо спиратися на такі поняття:

- **перше**, модель системи штучного розуму з використанням механізму штучного інтелекту (далі – ШРЗШІ) не може бути розглянута поза середовищем її існування, а також без урахування факторів, що впливають на неї;

- **друге**, штучний розум буде розглядатися як окремий блок моделі, що відповідає за формування мети системи (а саме постановка завдань і визначення збірки правил і критеріїв, необхідних для досягнення мети);

- **третє**, штучний інтелект у моделі системи буде представлений як набір інструментальних засобів, призначених для пошуку оптимального варіанта або варіантів для вирішення поставленого завдання;

- **четверте**, штучний розум виступає як «арбітр», він буде оцінювати прогнозовану якість методів, що використовуються для досягнення мети, моделюючи їх у внутрішньому віртуальному просторі; також стежитиме за тим, щоб були дотримані всі правила та критерії під час тестування розв'язуваної задачі.

Отже узагальнена схема моделі системи, на наш погляд, буде представлена у вигляді рис. 1.

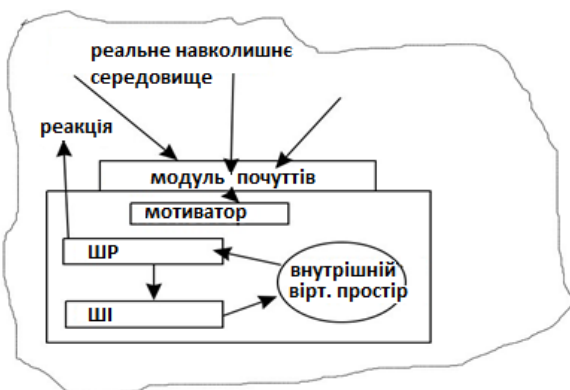


Рис. 1. Узагальнена схема моделі системи ШРЗШІ

Згідно з представленою нами моделлю, навколишнє середовище (далі – НС) зможе впливати на систему тільки через органи чуття (модуль почуттів). Отримані та оброблені дані будуть передаватися на модуль мотиватора, де формуються дані про зміни й впливи з боку НС [12] і передаються на аналіз модулю штучного розуму. На цьому етапі приймається попереднє рішення про реакцію на навколишнє середовище. Якщо необхідність такої реакції є, то штучний розум формує задачу, доповнюючи її правилами та критеріями (дотримання яких необхідно для її розв'язання), і передає пошук такого рішення штучному інтелекту. З моменту, коли виникла необхідність відповідної реакції системи, можна говорити про якісну взаємодію системи з НС, а саме про її поведінку. Під поведінкою системи ми розуміємо якість і характер зворотної реакції. Ми виділили чотири типи поведінки, а саме:

- 1) пасивну;
- 2) пасивно-активну;
- 3) активну;
- 4) рефлексорну.

Розглянемо кожен із цих видів окремо.

*Пасивна реакція*, відбувається так. Коли система штучного розуму через органи чуття отримує інформацію від навколишнього середовища, то для прийняття рішення використовується тільки набір із заздалегідь запропонованих варіантів за принципом підбору оптимально існуючого. Ця реакція не містить можливості пошуку нових рішень (рис. 2). Цю реакцію можна розглядати як найбільш примітивний прояв інтелекту. Ця реакція не містить глибокого аналізу ситуації й може бути представлена так:

$$R = \{X \mid P(X)\},$$

де  $R$  – реакція;  $X$  – подія;  $P(X)$  – набір рішень.

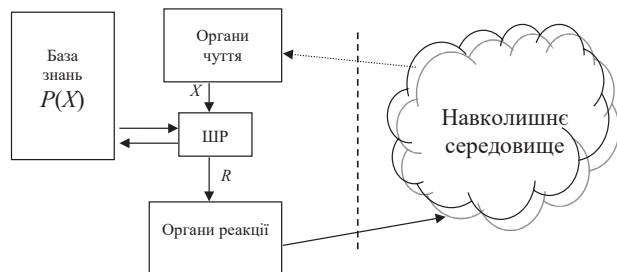


Рис. 2. Схема пасивної реакції системи ШРЗШІ

Під час процесу аналізу при пасивній реакції система вибирає найоптимальніші рішення з погляду конкретної ситуації в цей момент часу

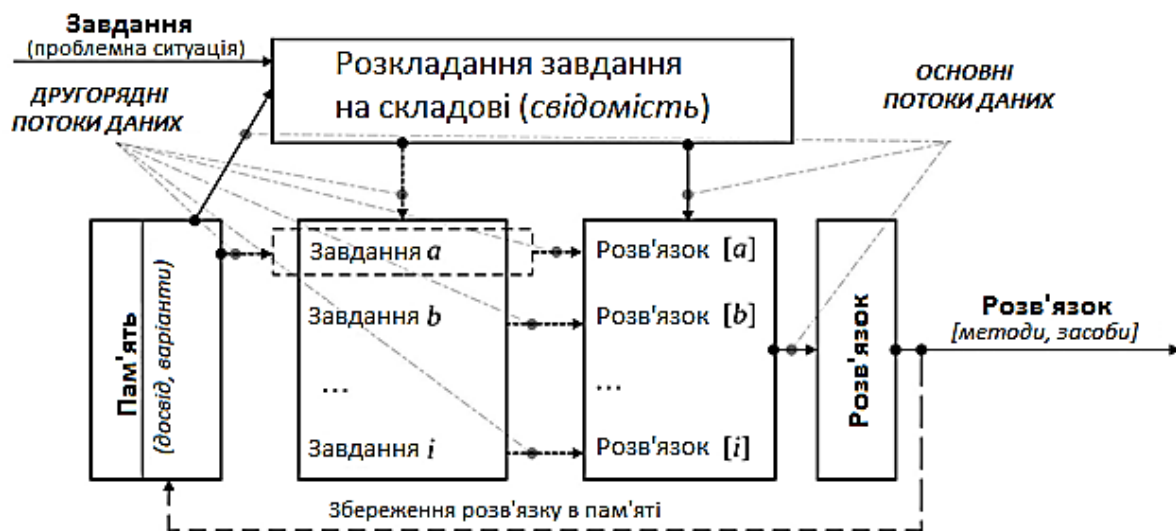


Рис. 3. Схематичний процес міркування

з набору наявних варіантів. Вибір варіанта відбувається з усієї можливої кількості наборів варіантів розв'язків, які накопичені, сформовані, упорядковані на основі «прожитого» нею життєвого циклу та збережені в базі знань (далі – БЗ).

Швидкість пошуку під час розв'язання задачі багато в чому залежить від накопиченої практики при осмислених міркуваннях у конкретних ситуаціях. Практичне розв'язання такого завдання зберігається в пам'яті у вигляді готових методів і засобів для розв'язання проблемної ситуації. На якість таких прийнятих рішень може вплинути «емоційний» і «фізичний» стан системи, її накопичений досвід, а також багато інших чинників, що впливають на систему з боку навколишнього середовища. Схематично процес такого міркування наведено на рис. 3.

Описати процес міркування вибору розв'язання з можливих варіантів можна математично так:

$$\begin{aligned} op(A) &= P \\ P &= \sum p(i) \\ res(i) &= list[p(i)] \\ R &= \sum res(i), \end{aligned}$$

де  $A$  – завдання (проблемна ситуація);  $R$  – результат;  $op$  – оператор розкладання завдання на складові потоки;  $P$  – основний потік даних;  $p(i)$  – другорядний потік даних;  $res(i)$  – проміжний результат;  $list$  – оператор списку готових рішень.

Як видно зі схеми, представленої на рис. 3, після розкладання завдання  $A$  на дискретні складові  $p(i)$  системі необхідно визначити рішення  $list$  для кож-

ної такої складової  $p(i)$ , щоб на основі отриманих результатів  $res(i)$  сформувати остаточну послідовність своїх методів і дій  $R$  у такій проблемній ситуації  $A$ . Тут необхідно зазначити, що проблемна ситуація може бути обумовлена часом  $t$  й іншими факторами, які вимагають від системи якомога швидше приймати оптимальні рішення, з огляду на можливість впливу безлічі другорядних факторів з боку навколишнього середовища.

Пасивно-активна реакція виражається у взаємодії ШРЗШІ з органами почуттів для отримання уточнень і більш повної по можливості інформації про подію навколишнього середовища, що надійшла або виконується.

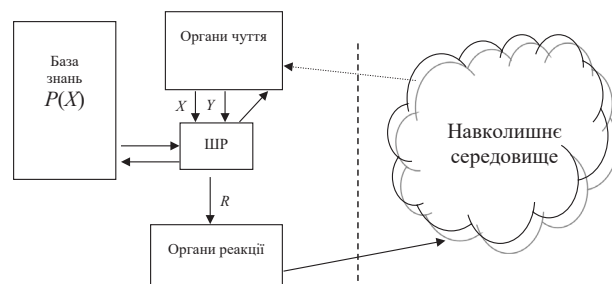


Рис. 4. Схема пасивно-активної реакції системи ШРЗШІ

Однак у цьому випадку все одно пошук оптимального рішення буде здійснено тільки з набору відомих варіантів (рис. 4).

Однак тут варто зазначити, що при такій реакції в системі з'являється більше можливостей для більш ефективного підбору варіанта прийнятого рішення в ситуації, що склалася. Так як ця реакція забезпечена можливістю збору уточнюючих



даних ззовні від навколишнього середовища шляхом уточнюючих запитів до органів чуття, вона може бути представлена так:

$$R = \{X, Y \mid P(X)\},$$

де  $R$  – реакція;  $X$  – подія;  $Y$  – уточнюючі дані;  $P(X)$  – набір рішень.

Активна реакція відбувається тоді, коли жоден із запропонованих варіантів не задовольняє умовам для прийняття ефективного рішення при ситуації, що виникла. У цьому разі буде відбуватися пошук (формування) нового варіанта рішення, виходячи з попереднього (накопиченого) досвіду (рис. 5). І саме ця ситуація є найбільш вірогідною для використання такої властивості системи, як розум. Саме в цьому випадку системі буде необхідно віртуально промодельовувати ситуацію для подальшої її реалізації.

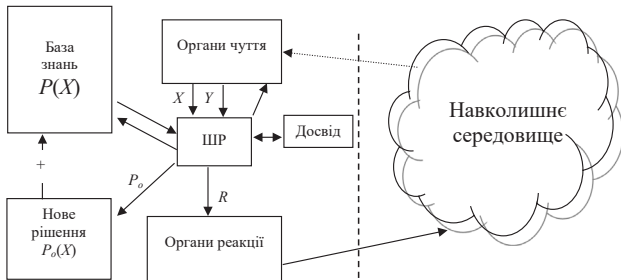


Рис. 5. Схема активної реакції системи ШРЗШІ

Математичний вигляд такої системи може бути представлений так:

$$R + P_o = \{X, Y \mid P(X) + P_o(X)\},$$

де  $R$  – реакція;  $X$  – подія;  $Y$  – уточнюючі дані;  $P_o(X)$  – накопичений досвід;  $P_o$  – новий досвід;  $P(X)$  – набір рішень.

Під час аналізу схеми (рис. 5) можна сказати, що система під час міркування для прийняття найбільш якісного й оптимального рішення повинна розв'язувати кожен другорядний потік аналізу, породжений від основного міркувального процесу. Це, у свою чергу, від системи вимагає витрат часу ( $\Delta t$ ) на розв'язок та аналіз кожного другорядного потоку аналізу, що може призвести до досить значних утрат часу загалом:

$$t = \sum \Delta t(p(i)),$$

де  $t$  – час, необхідний для розв'язання всіх другорядних потоків аналізу.

Якщо припустити, що штучна свідомість змогла б доповнити людську, узявши при цьому на себе функції паралельної обробки деяких другорядних потоків  $p(i)$  розумового процесу, що протікає в голові людського мозку, то в основний розумовий процес  $P$  надавалися б уже готові результати  $res(i)$ . Це, у свою чергу, звільнило б людський мозок від механічного перебирання

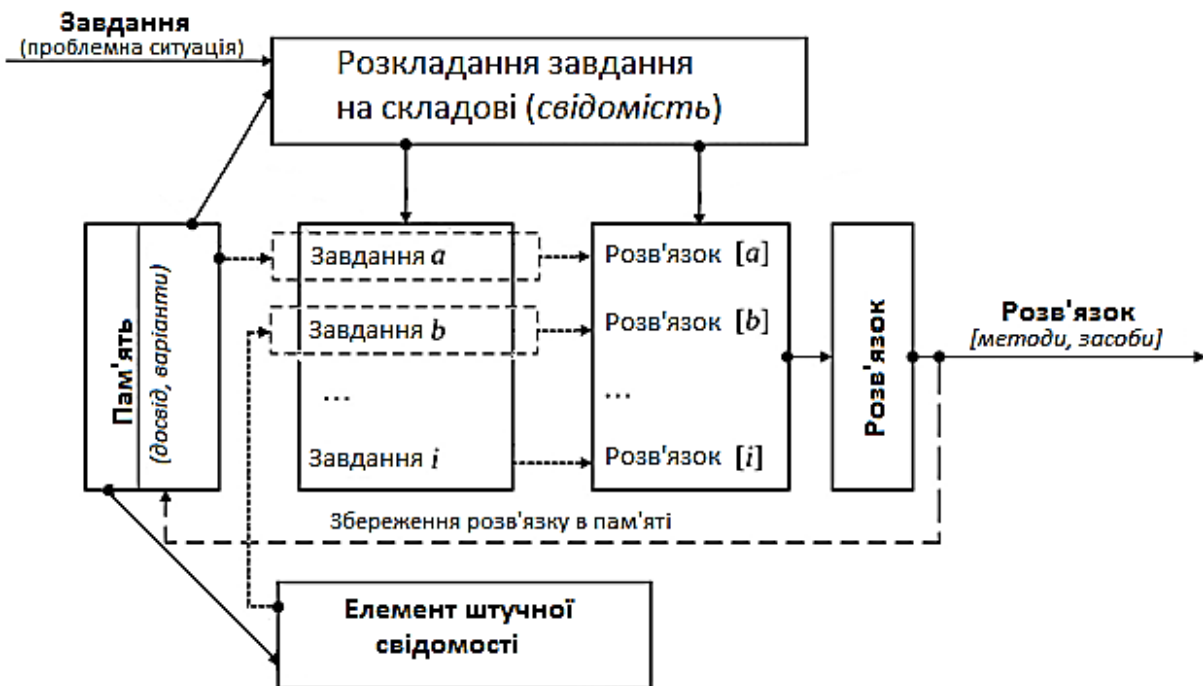


Рис. 6. Схематичний процес міркування з елементом штучної свідомості

$list[p(i)]$  усередині другорядних потоків  $p(i)$ , а отже, і призвело б до зменшення витрат часу для отримання кінцевого результату  $R$ . Схематично такий процес наведено на рис. 6.

Із цієї схеми видно, що обробка другорядних потоків буде виконуватися паралельно як природною свідомістю людини, так й елементом штучної свідомості, що реально дасть змогу підвищити продуктивність міркування або розумового процесу за рахунок звільненого часу.

Але тут необхідно також урахувати той факт, що на прийняття рішень у другорядних потоках розумового процесу елемент штучної свідомості не повинен надавати будь-яких власних впливів, а саме використовувати знання, які не випробувані свідомістю конкретної людини. Це зумовлюється тим, що рішення, яке приймає людина, має бути її власним рішенням і базуватися на знаннях, що придбані й апробовані нею в процесі її життя. У цьому разі людина гарантовано несе відповідальність за якість прийнятого нею рішення. Для цього необхідно, щоб під час ухвалення рішення в другорядному потоці думка штучної свідомості використовувала виключно знання конкретної людини, придбані нею в процесі життя. Це, звичайно, значною мірою може ускладнити можливість реалізації такої системи, так як отримати безпосередньо доступ до знань людини, до її пам'яті натепер дуже складно (якщо не сказати, нереально). Але тут можна зробити деякий відступ.

А якщо система ШРЗШІ буде виконувати контроль не на рівні головного мозку, а на рівні деяких органів людини? Наприклад, рук, ніг, можливо, органів чуття тощо. У такому разі система ШРЗШІ може бути розглянута як допоміжна система життєзабезпечення людини, отже, зможе знайти широке застосування в медицині.

Ну й, нарешті, *рефлекторна реакція*. Це реакція, яка виникає з боку системи, коли взаємодія з боку навколишнього середовища має заздалегідь відомий або, як варіант, загрозливий харак-

тер (рис. 7). У цьому разі ні інтелект, ні розум в ухваленні рішення не беруть активної участі. У таких ситуаціях рішення має прийматися невідкладно, щоб не допустити як руйнування самої системи, так і заподіяння шкоди системою навколишньому середовищу. Такого роду реакцію ще можна назвати «реакція самозахисту». Розглянемо реакції системи для кожної з груп на прикладі пошуку виходу системи ШРЗШІ з найпростішого лабіринту (рис. 8).

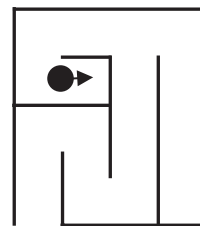


Рис. 8. Приклад лабіринту

Визначимо початкові умови.

Органи чуття:

- датчик на виявлення перешкод перед системою (дальність – 5 см);
- датчики (лівий, правий) для виявлення бічних перешкод.

Органи реакції:

- механізм руху вперед;
- механізм повороту наліво або направо.

База знань:

- 1 – у разі появи перешкоди на відстані 5 см виконати поворот спочатку наліво, а якщо це не можливо, тоді – направо;
- 2 – рефлекс – у разі виявлення перешкоди менше ніж 3 см зупинка;
- 3 – збережені дані про пройдений шлях.

Отже, перший варіант – *пасивна реакція*. Система, підійшовши до стіни, поверне ліворуч, виявивши знову стіну, виконає ще раз поворот ліворуч. Потім продовжить рух, поки не впреться знову в стіну, після чого виконає поворот, знову-таки, ліворуч, так як у базі поворот ліворуч перший. Отже, під час використання тільки пасивних чутливих реакцій у системи немає шансів вийти з лабіринту.

Другий варіант – *пасивно-активна чутлива реакція*. Підійшовши до стіни, система запросить дані з бічних датчиків на наявність перешкод. Лівий і правий дасть сигнал «перешкода». Система поверне ліворуч й опитає датчики. Лівий – «вільно», правий – «перешкода». Система поверне ліворуч і продовжить рух до стіни. Потім знову опитування датчиків, лівий – «перешкода»,

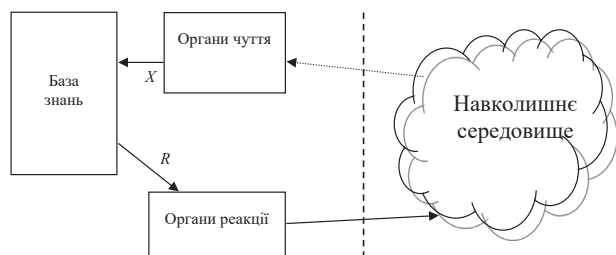


Рис. 7. Схема рефлекторної реакції системи ШР

правий – «вільно». І вже в цьому разі система поверне праворуч. Однак і в цьому випадку в системі немає шансів вийти з такого лабіринту, так як вона користується активним складником тільки в ситуації, коли наштовхнеться на перешкоду.

Третій варіант – *активно-чутлива реакція*. Розглядаючи третій варіант, варто відразу зазначити, що в цьому разі для накопичення досвіду система буде сканувати всі бічні стіни по маршруту пересування з постійним опитуванням бічних датчиків. Отже, під час пошуку система буде також фіксувати всі додаткові проходи вздовж коридорів, отже, зможе накопичити необхідний досвід про глухі кути й проходи всередині лабіринту.

Четвертий варіант – *рефлекторна реакція*. Якщо під час пошуку виходу перед системою

несподівано виникне перешкода ближче 3 см, вона негайно зупиниться й припинить пошук. Такий варіант, звісно, також не дасть системі змоги знайти вихід із лабіринту.

**Висновки.** У роботі наведена класифікація реакцій систем ШРЗШІ по групах. Описано схематичний і математичний вигляд реакції системи. Розглянуто найпростіший приклад «пошук виходу з лабіринту», системи штучного інтелекту з використанням різних залежно від класифікації реакцій з подальшою оцінкою їх ефективності.

Наприкінці хотілося б відзначити, що яким би неймовірно потужним не був би штучний розум, він величезною мірою буде залишатися залежним від засобів і методів взаємодії його з навколишнім світом.

### Список літератури:

1. Автоматы и разумное поведение: Опыт моделирования / Н.М. Амосов, А.М. Касаткин, Л.М. Касаткина и др. Киев : Наук. думка, 1973. 374 с.
2. Батырь А.Ю., Герр Р.Г. Компьютер обретает разум / под редакцией В.Л. Стефанюка. Москва : Мир, 1990. 240 с.
3. Гарбарчук В.І. Концептуальні основи теорії штучного інтелекту. *Искусственный интеллект*. 2004. № 3. С. 47–57.
4. Грязнов А.Ю. Абсолютное пространство как идея чистого разума. *Вопросы философии*. 2004. № 2. С. 127–147.
5. Валькман Ю.Р., Быков В.С. Контексты в процессах, образного мышления: классификации, структуры, свойства. *Когнитивное моделирование в лингвистике* : труды VII Международ. конф. Варна, 2005. С. 60–71.
6. Єфремов Ю.М., Єфремов М.Ф. Модель навколишнього середовища для штучного розуму. *Вісник ЖНАЕУ*. 2017. № 2 (61). С. 150–157.
7. Єфремов Ю.Н. Моделирование искусственного сознания. *Искусственный интеллект* : сборник науч. трудов I Международ. конф. Донецк, 2000. № 3. С. 48–51.
8. Зубаль И. Вселенский разум. *CHIP*. 2004. № 1. С. 80–84.
9. Крейн И.М. Естественный Разум и искусственный интеллект. III. Internet как этап развития внешней памяти Разумных систем (постановка проблемы). *УСМ*. 2001. № 1. С. 79–89.
10. Палагін О.В., Кургаєв О.П., Шевченко А.І. Ноосферна парадигма науки та штучний інтелект. *Кибернетика и системный анализ*. 2017. № 4. С. 12–21.
11. Frey C.B. & Osborne M.A. (2017). The future of employment: how susceptible are jobs to computerization. *Technological Forecasting and Social Change*. 2017. № 114. P. 254–280.
12. Gurkaynak G. Yilmaz I. & Haksever G. Stifling artificial intelligence: Human perils. *Computer Law & Security Review*. 2016. № 32 (5). P. 749–758.

### Vlasenko O.V., Iefremov Yu.M., Orynychak I.A. ARTIFICIAL MIND AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE, PRESENTATION OF TASK

*In this article describes such popular presently concepts as “artificial mind” and “artificial intelligence”. These concepts can be determined sufficiently differently, taking into account different individual features, namely, in area of cognition, thinking, perception, decision-making. As independent scientific direction artificial mind exists from 40th of XX century. Probably, that research in this direction will determine basic vector of development of informative society. The use of artificial mind in the different spheres of activity of man considerably simplifies work in those industries of vital functions of man, where ponderable influence is carried out by natural terms, ecology and other negative factors. It is justified that artificial mind has two main purposes: first, artificial mind refers to the theory of creating software and hardware capable of carrying out intellectual activity comparable to human intellectual activity; secondly, such software hardware itself, as well as activity with their help. Practical application of the intellectual systems was begun with development of the program for the decision of mathematical tasks, proof of theorems, chess games. In this*

*work the brought classification over of reactions of the systems of artificial mind with artificial intelligence on groups. The schematic and mathematical type of reaction of such systems is described. The simplest example – “search of exit from the labyrinth” is considered by intelligence systems with the use of different depending on classification reactions with the further estimation of their efficiency. Now many primary ideas of artificial mind are realized in the special technologies that entered our everyday life and perceived as a due. But, what powerful artificial mind was not, in a large measure it will remain dependency upon facilities and methods of co-operation of it with the surrounding world.*

**Key words:** *mind, knowledge, intellect, thinking, interpretation, schematic image, mathematical model.*



**Гончар С.Ф.**Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова  
Національної академії наук України

## МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ КІБЕРБЕЗПЕКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ SMART GRID

У роботі запропоновано метод оцінювання ризиків кібербезпеки інформаційних систем Smart Grid. Показано актуальність цього методу оцінювання ризиків для забезпечення кібербезпеки сучасних електроенергетичних об'єктів з використанням інтелектуальних мереж Smart Grid, оснащених цифровими системами моніторингу, управління, релейного захисту й протиаварійної автоматики. Проведено аналіз, який дає змогу виділити три види інформаційних ресурсів Smart Grid, що підлягають захисту від кібератак. Показано, що для своєчасного виявлення актуальних загроз кібербезпеки, визначення ймовірності їх реалізації, оцінювання збитків у разі їх реалізації, вибору адекватних та економічно обґрунтованих контрзаходів необхідним є розроблення методів оцінювання ризиків кібербезпеки інформаційних систем Smart Grid, а для більш коректної оцінки ризику кібербезпеки складної інформаційної системи необхідно враховувати умови, у яких функціонує кожний складник інформаційної системи, вид інформації, що циркулює в ній, модель загроз, модель порушника. Використовуючи векторну модель, ризики кібербезпеки представлені у вигляді векторів, тому ризик кібербезпеки, спричинений кожною із загроз, можна представити вектором, розташованим у тривимірному лінійному просторі, початок цього вектору співпадає з початком координат, а координати кінця вектору визначаються значеннями ризиків утрати конфіденційності, цілісності й доступності, що спричиняються цією загрозою. Запропонований метод оцінювання ризику кібербезпеки інформаційної системи Smart Grid дає змогу оцінювати ризик складної інформаційної системи залежно від умов, у яких функціонує кожний складник інформаційної системи, виду інформації, що циркулює в ній, моделі загроз, моделі порушника. Використання запропонованого методу дає можливість розроблення апаратно-програмних комплексів для автоматизації розрахунку ризику інформаційних систем Smart Grid, а також створення систем підтримки прийняття рішень з метою забезпечення кібербезпеки інформаційних систем Smart Grid.

**Ключові слова:** кібербезпека, ризик, Smart Grid, інформаційна система, метод, модель.

**Постановка проблеми.** Останнім часом у сучасній енергетиці активного розвитку набув напрям Smart Grid. Концепція Smart Grid полягає в тому, щоб зробити «інтелектуальними» генерацію, передавання й розподіл електричної енергії через наповнення електричних мереж сучасними засобами діагностики, електронними системами управління та обліку, алгоритмами, обмежувачами струмів короткого замикання надпровідних ліній та іншими автоматично регульованими технічними процесами.

Упровадження технології інтелектуальних мереж, з одного боку, спрощує й прискорює управління, але, з іншого боку, відкриває доступ до можливих кібератак і неправомірного використання даних.

Питання забезпечення кібербезпеки сучасних електроенергетичних об'єктів з використанням інтелектуальних мереж Smart Grid, оснащених цифровими системами моніторингу, управління, релейного захисту та протиаварійної автоматики,

стають дуже актуальними через новизну й недостатнє дослідження проблеми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно з дослідженнями [1], можна виділити ключові вимоги, які має забезпечувати нова електроенергетика:

- доступність – забезпечення споживачів енергією згідно з необхідними їм параметрами часу, місця та якості;

- надійність – можливість протистояння енергосистеми фізичним та інформаційним негативним впливам без тотальних відключень або високих витрат на відновлювальні роботи, а також її максимально швидке відновлення (самовідновлення);

- економічність – оптимізація тарифів на поставку та зниження загальносистемних витрат на генерацію й розподілення електричної енергії;

- ефективність – максимізація ефективності використання всіх видів ресурсів і технологій під час виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії;

– органічність із навколишнім середовищем  
– зниження негативного впливу на навколишнє середовище;

– безпека – недопущення ситуацій в електроенергетиці, потенційно небезпечних для людей і навколишнього середовища.

Усі приведені вимоги розглядаються як рівнозначні, порядок їх виконання може залежати від особливостей функціонування об'єкта або їх сукупностей.

Виконання цих вимог призводить до виникнення нових особливостей системи, таких як самовідновлення, мотивація активності споживача, супротив негативним впливам, забезпечення надійності електропостачання, різноманіття типів електричних станцій, розширення енергетичних ринків, оптимізація керування активами.

На думку Міністерства енергетики США, інтелектуальним мережам притаманні такі атрибути [2]:

– здатність до самовідновлення після збоїв у подачі електроенергії;

– можливість активної участі споживачів;

– стійкість до фізичного й кібернетичного втручання зловмисників;

– забезпечення необхідної якості переданої електроенергії;

– забезпечення синхронної роботи джерел генерації та вузлів зберігання електроенергії;

– підвищення ефективності роботи енергосистеми загалом.

Проведений аналіз дає змогу виділити три види інформаційних ресурсів Smart Grid, що підлягають захисту:

– персональні дані користувачів Smart Grid (Personal Data);

– технічна інформація, яка надходить від клієнтів мережі (Technical Data);

– інформація про системні збої й помилки, які відбуваються під час роботи мережі (Failures Data).

До вимог, які має реалізовувати система захисту, зараховані:

– запобігання неавторизованому розкриттю інформації, що захищається (конфіденційність);

– забезпечення постійного доступу користувачів до інформації, що захищається (доступність);

– запобігання несанкціонованій зміні інформації, що захищається (цілісність).

Питання оцінювання ризиків кібербезпеки інформаційних систем Smart Grid досліджувалося багатьма науковцями [3–5].

**Постановка завдання.** Отже, для своєчасного виявлення актуальних загроз кібербезпеки, визначення ймовірності їх реалізації, оцінювання збитків у разі їх реалізації, вибору адекватних та економічно обґрунтованих контрзаходів необхідним є розроблення методів оцінювання ризиків кібербезпеки інформаційних систем Smart Grid.

Для більш коректної оцінки ризику кібербезпеки складної інформаційної системи необхідно враховувати умови, у яких функціонує кожний складник інформаційної системи, вид інформації, що циркулює в ній, модель загроз, модель порушника. Залежно від виду інформації, яка підлягає захисту, та особливостей функціонування інформаційної системи ризики кібербезпеки можуть призводити до порушення конфіденційності, цілісності, доступності інформації або до їх певної комбінації. Для інформаційних систем Smart Grid можлива ситуація, коли критичним є забезпечення доступності й захист від несанкціонованих змін відкритої інформації. У такому разі виникає необхідність визначення ризиків кібербезпеки від втрати саме доступності та цілісності. Усі ці ризики можуть визначатися експертним методом і повинні враховуватися під час розрахунку результуючого ризику кібербезпеки Smart Grid.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо випадок ідентифікації певної загрози. Необхідно визначити ймовірність її реалізації, збитки від її реалізації та спричинені цією загрозою ризики порушення конфіденційності, цілісності, доступності інформації (таблиця 1).

Значення  $R_K$ ,  $R_{Ц}$ ,  $R_D$  у таблиці 1 обчислюються з виразів:

$$R_K = p \cdot h_K \cdot g_K, \quad (1)$$

$$R_{Ц} = p \cdot h_{Ц} \cdot g_{Ц}, \quad (2)$$

$$R_D = p \cdot h_D \cdot g_D, \quad (3)$$

де коефіцієнти  $g_K$ ,  $g_{Ц}$ ,  $g_D$  набувають значення 1, якщо загроза призводить до порушення, відпо-

Таблиця 1

Загроза	Ймовірність реалізації	Порушення					
		конфіденційності		цілісності		доступності	
		збитки	ризик	збитки	ризик	збитки	ризик
Загроза 1	$p$	$h_K$	$R_K$	$h_{Ц}$	$R_{Ц}$	$h_D$	$R_D$

відно, конфіденційності, цілісності, доступності, і набувають значення 0 – у протилежному випадку.

Дослідження [6; 7] показують, що ризики кібербезпеки можна представити у вигляді векторів. Отже, ризик кібербезпеки, спричинений кожною із загроз, можна представити вектором, розташованим у тривимірному лінійному просторі. Початок цього вектору співпадає з початком координат, а координати кінця вектору визначаються значеннями ризиків утрати конфіденційності, цілісності й доступності, що спричиняються цією загрозою (рис. 1).

Тоді ризик кібербезпеки, спричинений певною загрозою, можна представити виразом:

$$\vec{R}(R_K; R_C; R_D), \quad (4)$$

де  $R_K$ ,  $R_C$ ,  $R_D$  – спричинені цією загрозою ризики втрати, відповідно, конфіденційності, цілісності, доступності інформації.

**Рис. 1. Векторна модель ризику кібербезпеки**

У такому разі величина ризику кібербезпеки, спричиненого певною загрозою, буде визначатися виразом:

$$R = \sqrt{R_K^2 + R_C^2 + R_D^2}. \quad (5)$$

Розглянемо випадок наявності  $N$  загроз. Необхідно визначити ймовірності їх реалізації, збитки від їх реалізації та спричинені цими загрозами ризики порушення конфіденційності, цілісності, доступності інформації (таблиця 2).

Значення  $R_{K1}$ ,  $R_{Kn}$ ,  $R_{KN}$  у таблиці 1 обчислюються з виразів:

$$\begin{aligned} R_{K1} &= p_1 \cdot h_{K1} \cdot g_{K1}, \\ &\dots \\ R_{Kn} &= p_n \cdot h_{Kn} \cdot g_{Kn}, \\ &\dots \\ R_{KN} &= p_N \cdot h_{KN} \cdot g_{KN}, \end{aligned} \quad (6)$$

де коефіцієнти  $g_{K1}$ ,  $g_{Kn}$ ,  $g_{KN}$  набувають значення 1, якщо відповідні загрози призводять до порушення конфіденційності інформації, і набувають значення 0 – у протилежному випадку.

Значення  $R_{C1}$ ,  $R_{Cn}$ ,  $R_{CN}$  у таблиці 1 обчислюються з виразів:

$$\begin{aligned} R_{C1} &= p_1 \cdot h_{C1} \cdot g_{C1}, \\ &\dots \\ R_{Cn} &= p_n \cdot h_{Cn} \cdot g_{Cn}, \\ &\dots \\ R_{CN} &= p_N \cdot h_{CN} \cdot g_{CN} \end{aligned} \quad (7)$$

де коефіцієнти  $g_{C1}$ ,  $g_{Cn}$ ,  $g_{CN}$  набувають значення 1, якщо відповідні загрози призводять до порушення цілісності інформації, і набувають значення 0 – у протилежному випадку.

Значення  $R_{D1}$ ,  $R_{Dn}$ ,  $R_{DN}$  у таблиці 1 обчислюються з виразів:

$$\begin{aligned} R_{D1} &= p_1 \cdot h_{D1} \cdot g_{D1}, \\ &\dots \\ R_{Dn} &= p_n \cdot h_{Dn} \cdot g_{Dn}, \\ &\dots \\ R_{DN} &= p_N \cdot h_{DN} \cdot g_{DN}, \end{aligned} \quad (8)$$

де коефіцієнти  $g_{D1}$ ,  $g_{Dn}$ ,  $g_{DN}$  набувають значення 1, якщо відповідні загрози призводять до порушення доступності інформації, і набувають значення 0 – у протилежному випадку.

Використовуючи векторну модель ризику (рис. 2), ризики кібербезпеки  $R_1, \dots, R_N$  спричинені  $N$  загрозами, можна представити, відповідно, векторами:

$$\vec{R}_1(R_{K1}; R_{C1}; R_{D1}), \quad (9)$$

$$\vec{R}_N(R_{KN}; R_{CN}; R_{DN}), \quad (10)$$

**Таблиця 2**

Загроза	Імовірність реалізації	Порушення					
		конфіденційності		цілісності		доступності	
		збитки	ризик	збитки	ризик	збитки	ризик
Загроза 1	$p_1$	$h_{K1}$	$R_{K1}$	$h_{C1}$	$R_{C1}$	$h_{D1}$	$R_{D1}$
...	...	...	...	...	...	...	...
Загроза n	$p_n$	$h_{Kn}$	$R_{Kn}$	$h_{Cn}$	$R_{Cn}$	$h_{Dn}$	$R_{Dn}$
...	...	...	...	...	...	...	...
Загроза N	$p_N$	$h_{KN}$	$R_{KN}$	$h_{CN}$	$R_{CN}$	$h_{DN}$	$R_{DN}$

де  $R_{K1}, \dots, R_{KN}$  – ризики втрати конфіденційності інформації, спричинені, відповідно, загрозами 1, ...,  $N$ ;

$R_{I1}, \dots, R_{IN}$  – ризики втрати цілісності інформації, спричинені, відповідно, загрозами 1, ...,  $N$ ;

$R_{D1}, \dots, R_{DN}$  – ризики втрати доступності інформації, спричинені, відповідно, загрозами 1, ...,  $N$ .

У такому разі величина ризику кібербезпеки, спричиненого певною загрозою, буде визначатися виразом:

$$R_1 = \sqrt{R_{K1}^2 + R_{I1}^2 + R_{D1}^2}, \quad (11)$$

$$R_N = \sqrt{R_{KN}^2 + R_{IN}^2 + R_{DN}^2}. \quad (12)$$

Для визначення ризику кібербезпеки інформаційної системи загалом представимо вектори (9), (10) у вигляді:

$$\vec{R}_1 = \begin{pmatrix} R_{K1} \\ R_{I1} \\ R_{D1} \end{pmatrix}, \dots, \vec{R}_N = \begin{pmatrix} R_{KN} \\ R_{IN} \\ R_{DN} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Рис. 2. Застосування векторної моделі для  $N$  ризиків

Тоді з урахуванням правила додавання векторів вектор ризику кібербезпеки інформаційної системи загалом буде визначатися виразом:

$$\vec{R} = \vec{R}_1 + \dots + \vec{R}_N = \begin{pmatrix} R_{K1} \\ R_{I1} \\ R_{D1} \end{pmatrix} + \dots + \begin{pmatrix} R_{KN} \\ R_{IN} \\ R_{DN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{n=1}^N R_{Kn} \\ \sum_{n=1}^N R_{In} \\ \sum_{n=1}^N R_{Dn} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

де  $\sum_{n=1}^N R_{Kn}$ ,  $\sum_{n=1}^N R_{In}$ ,  $\sum_{n=1}^N R_{Dn}$  – ризики кібербезпеки складної інформаційної системи загалом від порушення конфіденційності, цілісності, доступності інформації відповідно.

Величина ризику кібербезпеки інформаційної системи загалом, спричиненого  $N$  загрозами, з урахуванням збитків від порушення конфіденційності, цілісності, доступності буде визначатися з виразу:

$$R = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N R_{Kn}\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N R_{In}\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N R_{Dn}\right)^2}. \quad (15)$$

З урахуванням викладеного структурно-аналітичне відображення методу оцінювання ризику кібербезпеки інформаційної системи Smart Grid представлено в загальному вигляді на рис. 3.

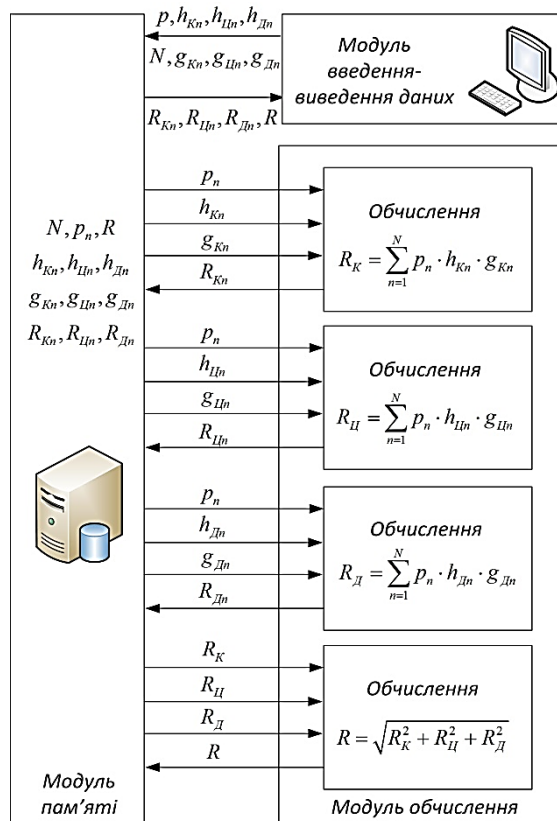


Рис. 3. Структурно-аналітичне відображення методу оцінювання ризику кібербезпеки Smart Grid

**Висновки.** Отже, у роботі запропоновано метод оцінювання ризику кібербезпеки інформаційної системи Smart Grid, який дає змогу оцінювати ризик складної інформаційної системи залежно від умов, у яких функціонує кожний складник інформаційної системи, виду інформації, що циркулює в ній, моделі загроз, моделі порушника. Використання запропонованого методу дає можливість розроблення апаратно-програмних комплексів для автоматизації розрахунку ризику інформаційних систем Smart Grid, а також створення систем підтримки прийняття рішень з метою забезпечення кібербезпеки інформаційних систем Smart Grid.



**Список літератури:**

1. European Smart Grids Technology Platform. URL: [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf).
2. Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid. URL: <http://www.rmi.org/Content/Files/EstimatingCostsSmartGRid.pdf>.
3. Leszczyna R. Standards on cyber security assessment of smart grid. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2018. № 22. P. 70–89.
4. Maziku H., Shetty S., Nicol D.M. Security risk assessment for SDN-enabled smart grids. *Computer Communications*. 2019. № 133. P. 1–11.
5. From old to new: Assessing cybersecurity risks for an evolving smart grid / L. Langer, F. Skopik, P. Smith, M. Kammerstetter. *Computers & Security*. 2016. № 62. P. 165–176.
6. Мохор В.В., Гончар С.Ф. Идея построения алгебры рисков на основе теории комплексных чисел. *Електронне моделювання*. 2018. Т. 40. № 4. С. 107–111.
7. Гончар С.Ф. Оцінювання ризиків кібербезпеки інформаційних систем об'єктів критичної інфраструктури : монографія. Київ : Альфа реклама, 2019. 176 с.

**Honchar S.F. METHOD FOR RISK ASSESSMENT OF CYBERSECURITY OF INFORMATION SYSTEMS OF SMART GRID**

*The paper proposes a method for risk assessment of cybersecurity of Smart Grid information systems. The relevance of this method of risk assessment to ensure cyber security of modern electricity facilities using smart grids of Grid, equipped with digital monitoring, control, relay protection and emergency automation systems is shown. An analysis has been made to identify three types of Smart Grid information resources to be protected against cyberattacks. It is shown that for timely identification of actual cybersecurity threats, determination of their probability of realization, estimation of losses in case of their implementation, selection of adequate and economically justified countermeasures it is necessary to develop methods for assessing cybersecurity risks of Smart Grid information systems, and for more correct assessment of cybersecurity risk information system, it is necessary to take into account the conditions in which each component of the information system operates, the type of information circulating in it, the model of threats, the model of the offender. Using the vector model, cybersecurity risks are represented as vectors, so the cybersecurity risk caused by each of the threats can be represented by a vector located in three-dimensional linear space, the beginning of this vector coincides with the origin of coordinates, and the coordinates of the end of the vector are determined by the values of risk, caused by this threat. The proposed method for assessing the cybersecurity risk of the Smart Grid information system allows to assess the risk of a complex information system, depending on the conditions in which each component of the information system, the type of information circulating in it, the model of threats, the model of the offender. The use of the proposed method enables the development of hardware and software systems to automate the risk calculation of Smart Grid information systems, as well as the creation of decision support systems to ensure the cybersecurity of Smart Grid information systems.*

**Key words:** cybersecurity, risk, Smart Grid, information system, method, model.

**Жихаревич В.В.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Шумиляк Л.М.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Останов С.Е.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Д'яченко Л.І.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Миронів І.В.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

## **КЛІТИННО-АВТОМАТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ ПІД ЧАС КРИСТАЛІЗАЦІЇ СПЛАВІВ**

*Робота присвячена розвитку та реалізації науково-практичних засад математичного моделювання технологічних процесів кристалізації бінарних сплавів і підвищенню ефективності процесу вирощування кристалів шляхом моделювання його динаміки на основі розроблення асинхронних клітинно-автоматних моделей дифузійних і теплових явищ із фазовими переходами першого роду. Здійснено імітаційне моделювання процесу направленої кристалізації розплавів з урахуванням сегрегації й залежності температури фазового переходу від складу матеріалу, що за певних умов може призводити до явища концентраційного переохолодження й нерівномірної геометрії фронту кристалізації. Отримана кількісна модель процесів теплопровідності й дифузії на основі неперервних клітинних автоматів, яка, на відміну від попередніх, дає змогу мати розв'язок задачі теплопровідності в будь-який момент часу. Проведене зіставлення вже відомих теоретичних та експериментальних даних і результатів чисельних розв'язків для декількох задач теплопровідності з відповідними результатами обчислювальних експериментів, що проводилися із застосуванням методу асинхронних клітинних автоматів. Результати порівняння підтверджують адекватність представленої моделі та можливість її застосування на практиці. Удосконалено методику проведення технологічного процесу отримання багатокомпонентних сплавів методом зонної плавки шляхом застосування алгоритму пошуку оптимальних умов вирощування. Розроблений програмний продукт, який реалізує клітинно-автоматну модель процесу теплопровідності, покликаний підвищити ефективність виробництва якісного термоелектричного матеріалу шляхом проведення обчислювальних експериментів.*

**Ключові слова:** фазовий перехід першого роду, клітинний автомат, теплопровідність, сегрегація, фронт кристалізації, ріст зерен, зонна плавка.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі імітаційне моделювання є ефективним засобом дослідження та проектування складних динамічних систем і процесів. Потреба в імітаційному моделюванні зростає у зв'язку з дорогими та/або неможливими дослідженнями над реальним об'єктом, а також через довготривалість проведення реального експерименту. Так, задачі чисельного моделювання неоднорідних динамічних систем дають змогу спостерігати еволюційні закономірності таких систем у режимі реального часу, особливо коли мова йде про задачі з нелі-

нійними параметрами матеріалів, складними граничними та початковими умовами, фазовими переходами з рухомими межами тощо. Але в більшості таких випадків аналітичні розв'язки отримати майже неможливо, а класичні числові методи розв'язку, засновані на різницевих схемах, можуть бути нестійкими. Класична модель фізичних процесів ґрунтується на диференціальних рівняннях, але практичне застосування її не дає змоги отримати прийнятні результати. У реальних практичних задачах вона часто застосовується в найпростіших випадках з низкою обмежень

і припущень. У зв'язку з цим останнім часом усе більшої популярності набувають альтернативні підходи. Широко застосовуються гнучкі – імітаційні або агентні – моделі, де кожному агенту можна приписати свої правила поведінки. Одним із таких підходів моделювання є метод клітинних автоматів (далі – КА). Він не тільки забезпечує опис фізичних властивостей матеріалу, а й може передбачати зміни на мікрорівні. Зокрема, процеси теплоперенесення природним чином апроксимуються неперервними моделями клітинних автоматів [1, с. 126; 2, с. 267].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теорія КА відома з 40-х рр. XX століття. Уперше ця ідея запропонована Джоном фон Нейманом для опису процесів самовідтворення в біології й техніці. Цей метод застосовують у математиці та фізиці, а також у біології, економіці, соціології, інформатиці тощо через свою простоту. Так, вони широко застосовуються для моделювання еволюційних, імовірнісних, газо- та гідродинамічних процесів [3, с. 77].

Робота [4, с. 444] стала значним кроком у розвитку уявлень про концентраційне переохолодження. У ній не тільки обґрунтований «первісний» критерій концентраційного переохолодження, а й з урахуванням адекватності моделі також запропоновано його модифікований варіант [4, с. 447]. Проте практичного застосування видозмінений критерій концентраційного переохолодження не отримав. Досить актуальним завданням є опис рівномірного твердіння розплавів у малих об'ємах з метою дослідження динаміки утворення зародків і росту зерен [5, с. 5508; 6, с. 4772]. При цьому процесами теплопровідності зазвичай нехтують, оскільки розглядаються порівняно малі (1 мм) фрагменти зразків. Натомість досить суттєвим є врахування поверхневої енергії, кристаліграфічної орієнтації та інших дрібнозернистих факторів.

Розвиток електронної техніки залежить насамперед від характеристик матеріалів, що використовуються для її виробництва. Зростання вимог до якості багатокомпонентних сплавів зумовлює модернізацію наявних технологій їх отримання. Досить актуальним завданням у виробництві кристалів є підвищення відсотка виходу корисного для подальшого використання матеріалу. Очевидно, що на цей відсоток впливають умови вирощування. Пошук оптимальних параметрів отримання матеріалів зазвичай можна виконувати на основі реальних експериментів, але це призводить до додаткових економічних витрат. Водночас

побудова комп'ютерних моделей процесів отримання матеріалів і проведення над ними низки обчислювальних оптимізаційних експериментів дає змогу значно скоротити ці витрати.

**Постановка завдання.** Актуальність роботи полягає в побудові клітинно-автоматної моделі процесу кристалізації сплавів шляхом застосування методів імітаційного моделювання. Метою дослідження є розроблення моделі дифузійних і теплових процесів з фазовими переходами, побудованої за допомогою методу асинхронних клітинних автоматів, яка б дала можливість дослідникам у рамках єдиної математичної моделі, представленої у вигляді системи ітераційних рівнянь, вирішити проблему емпіричного підбирання параметрів експерименту шляхом моделювання теплових процесів, не обмежуючись додатковими спрощеннями.

Ураховуючи все вищесказане, основним завданням дослідження є збільшення ефективності проведення процесу вирощування кристалів і прогнозування властивостей отриманого методом зонної плавки матеріалу в науково-дослідних лабораторіях і виробництві шляхом побудови асинхронної клітинно-автоматної моделі кристалізації сплавів і реалізації отриманої моделі в програмному продукті.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сутність моделювання процесів теплопровідності за допомогою клітинних автоматів полягає в такому: зразок розбивається на сукупність однакових клітин, однаковим чином з'єднаних між собою. Усі комірки утворюють так звану решітку клітинного автомата. Решітки можуть бути різної розмірності залежно від розмірності системи, що моделюється.

Уміст комірок клітинно-автоматного поля являє собою окремий лінійний масив з  $m$  деяких характеристик. Для нашого випадку основними є температура клітини  $T$ ; концентрація домішки  $C$ ; внутрішня теплота  $H$ , яка враховується під час моделювання фазових переходів і визначає відношення концентрації домішки в рідкій і твердій фазах. На початку розрахунків теплової або дифузійної динаміки клітинно-автоматне поле ініціюється заданими значеннями температури, концентрації або інших характеристик. Процес моделювання асинхронним методом являє собою ітераційний цикл клітинно-автоматних взаємодій і передбачає циклічне виконання трьох типових кроків:

1. На клітинно-автоматному полі випадковим рівномірним чином вибирається деяка клітина

$i = 1$  із цілочисельними координатами  $x_1, y_1, z_1$ .

2. Випадковим рівномірним чином вибирається деяка сусідня клітина  $i = 2$  із цілочисельними координатами  $x_2, y_2, z_2$ . Як схему сусідства прийнято окіл Неймана, тобто для двовимірного випадку в клітині є тільки чотири сусіди.

3. Відбувається клітинно-автоматна взаємодія між двома клітинами.

Уміст клітин КА-поля може набувати дійсних неперервних значень.

Шляхом декомпозиції великої досліджуваної системи на маленькі частинки (спільномірні з клітинами КА) отримана система ітераційних рівнянь (1).

Сутність клітинно-автоматних взаємодій полягає в модифікації неперервних значень відповідних характеристик клітин. Нехай значення характеристик клітин у момент часу  $(t+1)$  позначається штрихом ( $'$ ), а в теперішній момент часу  $t$  – без штриха. Правило переходу клітинного автомата, за яким визначається значення характеристик клітини в новому стані, має вигляд такої системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} T^i{}' = T^i + (T_{\text{cep}} - T^i) A_{\text{cep}} / M_{\text{max}}; \\ C^i{}' = C^i + (C_{\text{cep}} - C^i) D_{\text{cep}} / M_{\text{max}}; \\ \text{якщо } (T^i{}' > T_{\text{пл}}^i) \text{ та } (H^i < H_{\text{пл}}^i), \\ \text{тоді: } \{ H^i{}' = H^i + \Delta H^i; T^i{}' = T_{\text{пл}}^i \}; \\ \text{якщо } (H^i{}' > H_{\text{пл}}^i), \\ \text{тоді: } \{ T^i{}' = T_{\text{пл}}^i + (H^i{}' - H_{\text{пл}}^i) / q_L^i; H^i{}' = H_{\text{пл}}^i \}; \\ \text{якщо } (T^i{}' < T_{\text{пл}}^i) \text{ та } (H^i > 0), \\ \text{тоді: } \{ H^i{}' = H^i + \Delta H^i; T^i{}' = T_{\text{пл}}^i \}; \\ \text{якщо } (H^i{}' < 0), \\ \text{тоді: } \{ T^i{}' = T_{\text{пл}}^i + H^i{}' / q_S^i; H^i{}' = 0 \}; \\ H^i{}' = H^i + Z \Delta H^i D_{\text{cep}} / M_{\text{max}}; \\ H^{(3-i)}{}' = H^{(3-i)} + Z \Delta H^i D_{\text{cep}} / M_{\text{max}}, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\begin{aligned} T_{\text{cep}} &= \frac{w^1 T^1 + w^2 T^2}{w^1 + w^2}, \quad w^i = \rho_L^i q_L^i \frac{H^i}{H_{\text{пл}}^i} + \rho_S^i q_S^i \left( 1 - \frac{H^i}{H_{\text{пл}}^i} \right), \\ C_{\text{cep}} &= C_L \frac{H^i}{H_{\text{пл}}^i} + C_S \left( 1 - \frac{H^i}{H_{\text{пл}}^i} \right), \quad C_L = \frac{C}{P_L + K_0 P_S}, \quad C_S = K_0 C_L, \quad P_L = \frac{H^1 + H^2}{H_{\text{пл}}^1}, \\ P_S &= 2 - P_L, \quad C = C^1 + C^2, \quad M_{\text{max}} = \max(A_{\text{max}}, D_{\text{max}}), \\ T_{\text{пл}}^i &= T_L(C^i) \frac{H^i}{H_{\text{пл}}^i} + T_S(C^i) \left( 1 - \frac{H^i}{H_{\text{пл}}^i} \right), \quad T_S(C) = T_{\text{пл}}(0) + \text{tg}(\alpha) C, \\ T_L(C) &= T_{\text{пл}}(0) + \text{tg}(\alpha) C K_0, \quad A_{\text{cep}} = \frac{A^1 + A^2}{2}, \\ A^i &= \frac{\eta_L^i}{\rho_L^i q_L^i} \frac{H^i}{H_{\text{пл}}^i} + \frac{\eta_S^i}{\rho_S^i q_S^i} \left( 1 - \frac{H^i}{H_{\text{пл}}^i} \right), \quad \Delta H^i = H_{\text{пл}}^i \frac{\Delta T^i}{T_{\text{пл}}^i}, \quad \Delta T^i = T^i - T_{\text{пл}}^i, \\ D_{\text{cep}} &= \frac{D^1 + D^2}{2}, \quad D^i = D_L^i \frac{H^i}{H_{\text{пл}}^i} + D_S^i \left( 1 - \frac{H^i}{H_{\text{пл}}^i} \right), \quad q_{\text{cep}}^i = \frac{q_L^i + q_S^i}{2}, \\ \Delta T_{\text{пл}}^i &= \frac{H_{\text{пл}}^i}{q_{\text{cep}}^i} + T_L(C^i) - T_S(C^i), \quad Z = \text{sign}(1 - K_0) \cdot \text{sign}(C^i - C^{(3-i)}). \end{aligned}$$

Тут  $i = 1, 2$  – значення індексу, що відповідає вибраній і сусідній клітині відповідно,  $T$  – темпе-

ратура,  $A$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\eta$  – коефіцієнт теплопровідності,  $q$  – питома теплоємність,  $\rho$  – питома густина,  $C$  – концентрація домішки,  $D$  – коефіцієнт дифузії домішки. При цьому нижніми індексами  $S$  та  $L$  позначено відповідні параметри для твердої й рідкої фаз, також  $H_{\text{пл}}^i$  – прихована теплота плавлення,  $T_{\text{пл}}(0)$  – температура плавлення при нульовій концентрації домішки,  $K_0$  – рівноважний коефіцієнт сегрегації домішки,  $\text{tg}(\alpha)$  – тангенс кута нахилу концентраційної залежності температури плавлення (крива *Solidus*).

Зокрема, перше рівняння системи (1), по суті, є клітинно-автоматною апроксимацією рівняння теплопровідності, друге – дифузії домішки, третє та четверте рівняння описують процес плавлення, п'яте й шосте – процес кристалізації, сьоме й восьме рівняння мають місце за відсутності градієнта температур, тобто в разі рівномірного охолодження.

Знайдено час однієї клітинно-автоматної взаємодії шляхом проведення низка обчислювальних експериментів, сутність яких полягала в порівнянні клітинно-автоматної динаміки за різної кількості комірок  $N$  клітинно-автоматного поля з конкретним розв'язком нестационарного рівняння теплопровідності (дифузії). Отже, час однієї клітинно-автоматної взаємодії для тривимірного випадку, коли КА-поле налічує  $N_x \times N_y \times N_z$  клітин, час взаємодії дорівнює:

$$t_{1\text{КА}} = \frac{d_x^2}{M_{\text{max}}} \frac{1}{6N_x^3 N_y N_z} = \frac{d_y^2}{M_{\text{max}}} \frac{1}{6N_y^3 N_x N_z} = \frac{d_z^2}{M_{\text{max}}} \frac{1}{6N_z^3 N_y N_x}, \quad (2)$$

де  $N_x, N_y, N_z$  – кількість комірок клітинно-автоматного поля вздовж осі  $x, y, z$  відповідно.

Аналізуючи рівняння (2), можна дійти висновку, що збільшення розмірності поля КА призводить до збільшення кількості клітинно-автоматних взаємодій, яку варто провести протягом деякого модельного проміжку часу, але при цьому також збільшується й точність розрахунків.

Цілком очевидно, що для забезпечення адекватності процесу моделювання розмірність клітинно-автоматного поля повинна бути якомога більшою. З іншого боку, це неминуче призведе до занадто довгого процесу моделювання. Тут за аналогією з чисельними схемами розв'язку виникає проблема пошуку компромісу між точністю розв'язку та часом, необхідним для його отримання. Тобто вибір кількості клітинних автоматів визначає точність моделювання, а також впливає на час розрахунків.

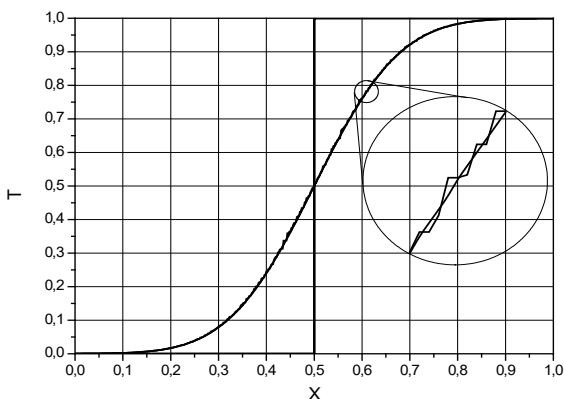
Для підтвердження адекватності моделі (1) проведемо порівняння розв'язку, отриманого за



допомогою КА-моделювання, з аналітичним і чисельним розв'язком для декількох варіантів задач.

Розглянемо випадок теплопровідності для одновимірного однорідного зразка з постійним коефіцієнтом температуропровідності. При цьому припустимо, що теплофізичні характеристики не залежать від температури. У такому випадку задача зводиться до розгляду теплопередачі через плоску нескінченну пластину або ізольований стержень. Процес теплопровідності в цьому разі описується диференціальним рівнянням і має аналітичний розв'язок [7, с. 11], а система рівнянь (1), що описує клітинно-автоматну взаємодію, зводиться до одного (першого) рівняння, яке описує зважене усереднення температури з часом. Отримані результати обчислювального експерименту на основі клітинних автоматів добре узгоджуються з результатами аналітичного розв'язку задачі теплопровідності (рис. 1), що підтверджує адекватність використання клітинно-автоматного підходу щодо апроксимації розв'язку нестационарного рівняння теплопровідності.

Проведемо апробацію моделі (1) на прикладі нестационарної задачі теплопровідності з урахуванням фазових переходів першого роду, так званої задачі Стефана. Класичним прикладом задачі теплопровідності з рухомою границею поділу фаз може слугувати задача промерзання вологого ґрунту.



**Рис. 1.** Графік розподілу температури в зразку в момент часу  $t = 0,01$  с,  $N = 500$ ; суцільна лінія — аналітичний розв'язок, ламана — клітинно-автоматний розв'язок; у правій частині рисунка — збільшений у десять разів фрагмент температурного розподілу

Результати обчислювальних експериментів для КА-моделі вздовж осі  $x$  у межах похибки клітинно-автоматного «шуму» збігаються між собою й з відповідними результатами чисельного рішення

рівнянь теплопровідності для заданої задачі [8, с. 13]. Проведено дослідження цих результатів на предмет стійкості рішення й швидкості проведення розрахунків з однаковою точністю рішення при ідентичних системних параметрах. Показано, що швидкість обчислень КА-методу приблизно у 2 рази більша за швидкість сіткових методів при однаковій кількості комірок КА-поля й кількості вузлів сітки при кінцево-різницевоїх схемах. Окрім цього, отримана абсолютна стійкість КА-моделі, на відміну від явної кінцево-різницевої схеми, де не виконується закон збереження енергії і спостерігається нестійка її поведінка.

Під час моделювання сегрегації для побудови температурного розподілу в зразку враховується домішкова підсистема (вплив концентрації домішки на температуру плавлення). Для отримання якісної картини перерозподілу домішки необхідно зв'язати концентрації домішок твердої та рідкої фаз з відповідним відношенням внутрішньої теплоти й прихованої теплоти плавлення. У цьому разі система рівнянь (1) майже не змінюється: не враховується лише напрямлений рух флуктуацій внутрішньої енергії, який описують останні 2 рівняння системи.

Проведемо низку обчислювальних експериментів, окремий приклад яких представлено на рис. 2. Наведені результати розрахунків розподілу відносної концентрації домішки вздовж фрагменту зразка в процесі кристалізації цілком узгоджуються з експериментальними даними.

Адекватність клітинно-автоматної моделі (1) перевіримо також на моделюванні явища концентраційного переохолодження під час вирощування легованих кристалів, тобто розглянемо випадок, коли швидкість росту кристала більша за критичну (рис. 3).

З рисунку видно, що перевищення швидкості росту  $V$  деякого критичного значення  $V_{\text{крит}}$  призводить до нестабільної поведінки фронту кристалізації, а отже, і до нерівномірного розподілу домішки в твердій фазі.

Як термодинамічні параметри матеріалу обрано параметри системи олово-сурма ( $\text{Sn-Sb}$ ), де олово — основний матеріал, а сурма — домішка з відносною концентрацією  $C_0 = 0,01$ , тобто 1%. Результати моделювання розподілу концентрації домішки у дво- або тривимірних випадках, де можна побачити різноманіття комірчастих структур, представлені на рис. 4.

З аналізу таблиці 1 і рис. 4 видно, що поява концентраційного переохолодження в процесі росту кристалів узгоджується з даними, описаними

в наукових джерелах: чим більша фактична швидкість  $V$  перевищує критично допустиму  $V_{\text{крит}}$ , тим більш яскраво проявляється явище комірчастого росту.

Розглянемо приклади моделювання різновидів форми фронту кристалізації під час концентраційного переохолодження: поява зародків кристалізації в розплаві неподалік границі розділу фаз, комірчастий ріст твердої фази виключно з поверхні монолітного кристалу. Плоский фронт кристалізації й відсутність нерівномірності розподілу домішки у

твердій фазі спостерігається при низьких швидкостях руху фронту кристалізації та високому градієнті температур на фронті кристалізації. У протилежному разі матиме місце явище концентраційного переохолодження. А знаходження оптимальних умов, тобто максимальної швидкості й найменшого градієнта, за яких не буде виникати концентраційне переохолодження, є основою для підвищення економічної ефективності виробництва кристалів.

Для складних задач теплопровідності порівняння наближеного КА-рішення проводилося

Таблиця 1

Основні параметри моделі для рис. 4.

Зразок:	а)	б)	в)	г)	д)	е)
$G, ^\circ\text{C}/\text{см}$	8	2	2	0,3	25	6
$D_L, \text{м}^2/\text{с}$	$10^{-7}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$	$10^{-8}$
$V_{\text{крит}}, \text{мм}/\text{год}$	125	30	2,5	0,5	40	10
$V, \text{мм}/\text{год}$	100	100	100	100	30	30
$C_{\min}$	0,0089	0,0074	0,0019	0,0028	0,0086	0,0072
$C_{\max}$	0,0111	0,0143	0,0325	0,0259	0,0114	0,0117

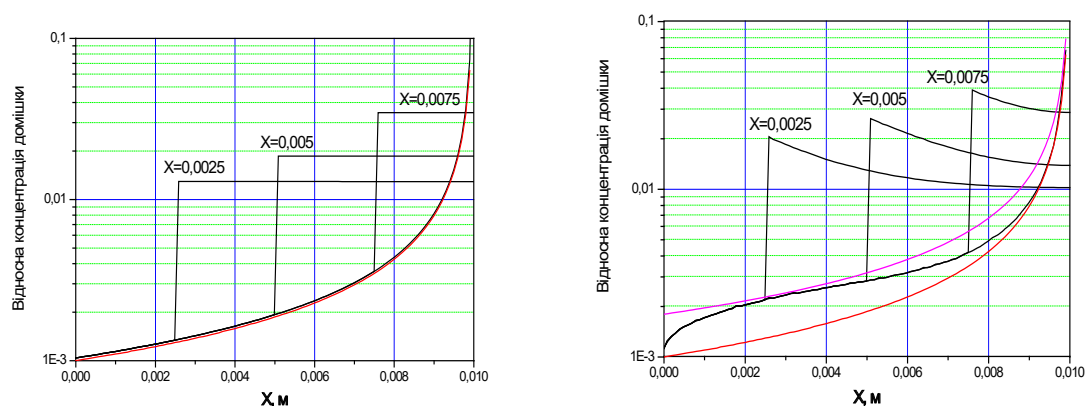


Рис. 2. Графік розподілу відносної концентрації домішки вздовж фрагменту зразка в процесі кристалізації; нижня крива – рівноважна кристалізація в умовах безмежно малої швидкості росту

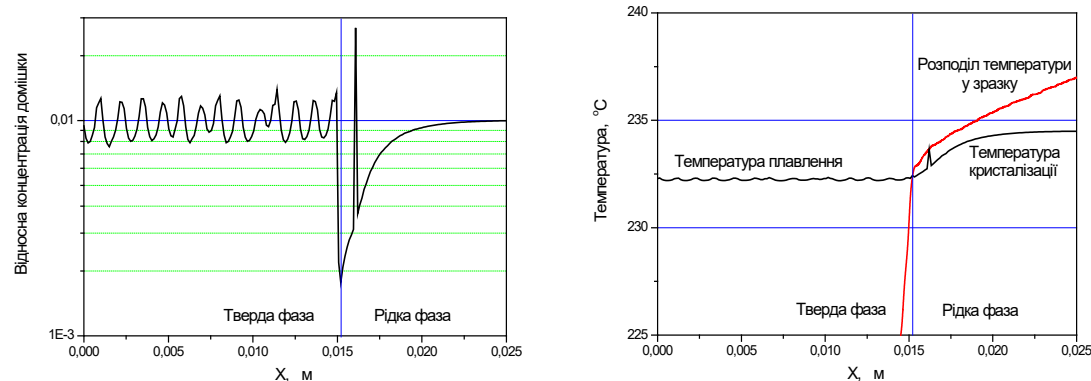


Рис. 3. Графіки розподілу відносної концентрації домішки (лівий графік) і температури в зразку, а також температури плавлення й кристалізації (правий графік); основні параметри процесу: градієнт температур  $G = 2 ^\circ\text{C}/\text{см}$ ;  $D_L = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $V_{\text{крит}} = 30 \text{ мм}/\text{год}$ ;  $V = 100 \text{ мм}/\text{год}$

з практичними результатами, отриманими під час експериментальних досліджень. Проведено низку контрольних експериментів. Отримано такі результати: для підібраних параметрів процесу моделювання вирощування кристалу телуриду вісмуту ( $Bi_2Te_3$ ), за яких явище концентраційного переохолодження в моделі не виникало й спостерігався плоский фронт кристалізації, реальне відхилення фронту кристалізації від плоскої форми в результаті проведення лабораторних експериментів не перевищувало допустимого діапазону ( $\sim 7\%$ ). Під час використання як домішки свинцю, який не застосовувався у виробництві раніше, отримано злиток, розподіл  $Pb$  у якому не відрізняється більше ніж на 5% від розподілу, отриманого в результаті обчислювального експерименту.

Для моделювання динаміки утворення зародків і росту зерен досліджено задачу рівномірного твердіння розплавів у малих об'ємах (рис. 6). Параметри обчислювальних експериментів: розміри КА-поля  $250 \times 250$ ; розміри однієї клітини – 1 мкм. Параметри матеріалу аналогічні параметрам алюмінію з домішкою міді. Проведемо порівняння отриманих результатів моделювання з експериментальними даними, представленими в літературі [9, с. 60]. Аналізуючи результати обчислювальних експериментів, спостерігається зменшення розмірів зерен і збільшення їх густини зі збільшенням швидкості охолодження. Ці результати цілком узгоджуються з раніше описаною в літературі картиною процесу [9, с. 62], де підтверджено той факт, що при однаковому значенні коефіцієнта дифузії в разі збільшення швидкості охолодження розплаву середня довжина дрейфу флуктуацій внутрішньої енергії зменшується, а отже, і зменшуються середні розміри зерен і збільшується густина їх розподілу (рис. 5).

Розроблено комп'ютерну систему для збільшення ефективності процесу зонної плавки шляхом пошуку оптимальних умов вирощування, поліпшення точності регулювання температури росту термоелектричного матеріалу. Можливість пошуку оптимальних параметрів моделювання дає змогу отримати якісний злиток за максимально коротким часом (рис. 6). Використовуючи запропоновану програму моделювання та автоматизованого управління процесом зонної плавки, можемо визначити оптимальні параметри злитків з мінімумом розкиду складу. Результати експлуатації системи для пошуку оптимальних параметрів процесу вирощування продемонстрували її практичну цінність. Зокрема, час вирощування телуриду вісмуту ( $Bi_2Te_3$ ) при середніх розмірах

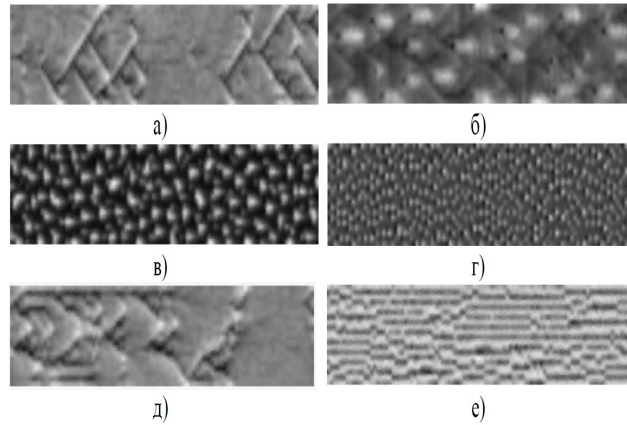


Рис. 4. Приклади різновидів нерівномірності розподілу концентрації домішки внаслідок концентраційного переохолодження (комірчастого росту кристалу)

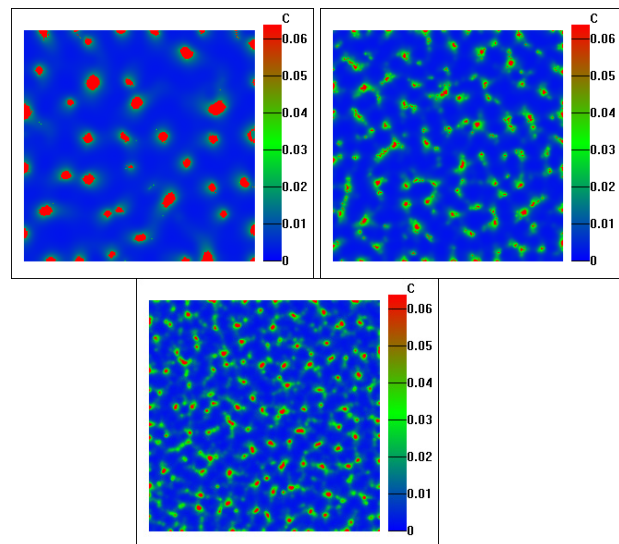


Рис. 5. Графік розподілу концентрації домішки при різних швидкостях охолодження розплаву, отриманий при КА-моделюванні: а) – 0,10 C/s; б) – 10 C/s; в) – 100 C/s

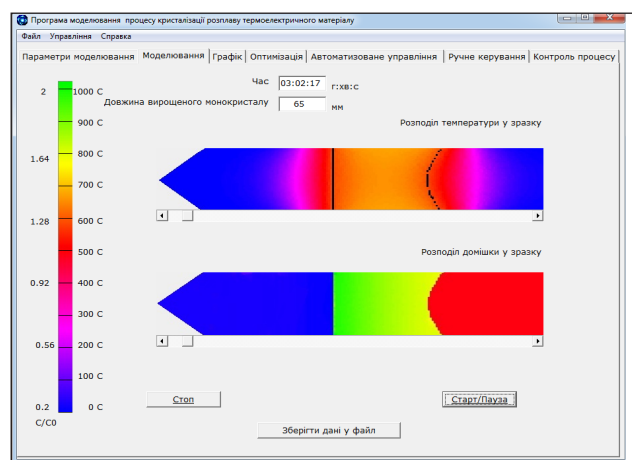


Рис. 6. Інтерфейс програми управління процесом вертикальної зонної плавки: вкладка моделювання процесу

зразків 350×20 мм вдалося зменшити в середньому з 22 до 18 годин, тобто майже на 20%.

При цьому явища концентраційного переохолодження не спостерігалось, оскільки в протилежному разі вирощені злитки були б крихкими та непридатними ані до алмазної різки, ані до подальшого використання в термоелектричних елементах. Крім того, відхилення фронту кристалізації від плоскої форми також не перевищувало допустимого діапазону, що підтверджувалося вимірюваннями радіального розподілу питомої електропровідності й термо-е.р.с., які суттєво залежать від розподілу складу матеріалу. Водночас відсоток виходу придатного матеріалу вздовж злитків майже не змінився: як і раніше, приблизно по 25 мм на початку та кінці злитків видалялися як браковані.

Окрім зменшення часу вирощування, описана система дає змогу проводити низку обчислювальних експериментів відносно нових складів матеріалу й тим самим відмовитися від використання методу «спроб і помилок».

**Висновки.** У роботі запропоновано застосування методу асинхронних клітинних автоматів для побудови імітаційної моделі процесів, що виникають під час кристалізації сплавів, перевірено й підтверджено адекватність її застосування та розроблено програмний продукт для використання в лабораторіях термоелектричного матеріалознавства, що дасть можливість суттєво підвищити ефективність досліджень за рахунок зменшення вартості виробництва та скорочення часових витрат.

#### Список літератури:

1. Бобков С.П., Войтко Ю.В. Использование систем клеточных автоматов для моделирования нелинейных задач теплопроводности. *Химия и химическая технология*. 2009. Том 52. № 11. С. 126–128.
2. Лиманова Н.И., Мамзин Е.А., Матвеев С.Г. Моделирование процессов теплообмена. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2009. Вып. 3. № 19. С. 265–269.
3. Бандман О.Л. Клеточно-автоматные модели пространственной динамики. *Системная информатика*. 2005. Вып. 10. С. 57–113.
4. Mullins W.W., Sekerka R.F. Stability of a planar interface during solidification of a dilute binary alloy, *J. Appl. Phys.* 1964. V. 35. № 20. P. 444–451.
5. Zheng C., Raabe D. Interaction between recrystallization and phase transformation during intercritical annealing in a cold-rolled dual-phase steel: A cellular automaton model. *Acta Mater.* 2013. № 61. P. 5504–5517.
6. Zheng Ch., Raabe D., Li D. Prediction of post-dynamic austenite-to-ferrite transformation and reverse transformation in a low-carbon steel by cellular automaton modeling. *Acta Mater.* 2012. Vol. 60. P. 4768–4779.
7. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности : учебное пособие. Томск : ТПУ, 2007. 172 с.
8. Аринштейн Э.А. Промерзание влажного грунта, *Вестник Тюменского государственного университета*. 2010. № 6. С. 11–14.
9. Krupiński M., Labisz K., Dobrzański L., Rdzawski Z. Image analysis used for aluminium alloy microstructure investigation. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2010. Vol. 42. P. 58–65.

#### **Zhikharevich V.V., Shumylyak L.M., Ostapov S.E., Diachenko L.I., Myroniv I.V. CELLULAR AUTOMATA SIMULATION OF THERMAL PROCESSES WHEN ALLOYS CRYSTALLIZATION**

*This work describes development and implementation of scientific principles of mathematical modeling of first ordered phase transformations processes and is presented to increase efficiency of crystal growth process by modeling its dynamics based on the development of asynchronous cellular automaton models of diffusion and thermal phenomena with first-order phase transitions. Simulation of the process of alloys directed crystallization was performed taking into account segregation and dependence of the phase transition temperature on the material. This can, under certain conditions, lead to concentrated overcooling and uneven geometry of crystallization front. A quantitative model of the processes of diffusion and heat conductivity through continuous cellular automata is obtained. This model, unlike previous ones, provides a solution to the problem of heat conductivity at any point in time. A comprehensive testing of the constructed model was conducted to confirm the adequacy of its application. It demonstrated the high accuracy and flexibility of the proposed model. Methodology for conducting a technological process to obtain multicomponent alloys by the method of zone melting was improved by application of the searching algorithm of optimal growing conditions. The automated control of the experimental setup of zone cultivation has been performed. It makes it possible to cultivate crystals with high accuracy adherence to the necessary experimental conditions. This in its turn allows for obtaining output material that meets high quality requirements. The software product is developed that runs cellular automata model of thermal conductivity and is intended to increase the efficiency of thermoelectric material quality through computational experiments.*

**Key words:** first order phase transition, cellular automata, heat conductivity, segregation, front of crystallization, grains growth, zone melting.



**Залужна Г.В.**Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут  
Української інженерно-педагогічної академії**Нефьодова І.В.**Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут  
Української інженерно-педагогічної академії

## РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНИХ ВІДЕОРОЛИКІВ ДЛЯ РЕКЛАМНОЇ КАМПАНІЇ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

У статті розглянуто сутність та специфіку реклами закладів вищої освіти, сучасні засоби рекламування освітніх послуг. Рекламуванням своїх послуг займаються всі навчальні заклади, для чого використовуються засоби масової інформації, зовнішня реклама, виставкова діяльність, дні відкритих дверей, науково-практичні конференції тощо. У сучасних умовах найпоширенішою є електронна реклама – вид рекламно-інформаційної роботи, що являє собою розміщення рекламно-інформаційних матеріалів у мережі Інтернет: на власному офіційному сайті навчального закладу, на інших освітніх сайтах, у соціальних мережах, розсилка рекламних об'яв по електронній пошті. Визначено, що одним з поширених засобів реклами є інформаційні відеоролики. Створення рекламного відеоролику являє собою складний, творчий процес. У статті розглянуто найбільш популярні різновиди рекламних відеороликів, етапи їх створення: препродакшн, продакшн, постпродакшн. Розглянуто сутність відеомонтажу, охарактеризовано його види. Для створення відео наразі існує величезна кількість відеоредакторів, також є чимало простих програм для створення відео онлайн. Ці редактори відрізняються за функціоналом, зовнішньому оформленню, вони розраховані на користувачів з різним рівнем знань. Здійснено короткий огляд деяких існуючих популярних програм для створення відео: Movavi Video Editor, VideoPad Video Editor, Sony Vegas, Pinnacle VideoSpin. Виділено переваги та недоліки цих відеоредакторів. Вибрати кращу програму для редагування відео з існуючого різноманіття практично неможливо. Кожен фахівець особисто для себе вирішує, який редактор підходить йому більше за інших. Обґрунтовано вибір та виділено головні переваги професійної програми для нелінійного монтажу відеороликів Adobe Premiere Pro CC. За допомогою цієї програми студентами ЗВО разом із викладачами розроблено рекламно-інформаційні відеоматеріали. Представлено перелік розроблених матеріалів для рекламної кампанії закладу вищої освіти. У сучасних умовах використання витрат на рекламну кампанію закладу вищої освіти доцільно привернути увагу на створення інформаційних відеороликів із залученням студентів.

**Ключові слова:** заклад вищої освіти, рекламна кампанія, інформаційні відеоролики, розробка, відеомонтаж.

**Постановка проблеми.** Рекламно-інформаційна діяльність служить для того, щоб сповістити різними способами про нові товари або послуги та їх властивості, і спрямована на потенційного споживача, служить для просування його продукції та ідей. Реклама є частиною комунікаційної діяльності. Активно діючи на споживача, реклама дуже впливає на формування потреб в цілому: рівня і стилю споживання, способу життя, моди тощо.

Сьогодні заклади освіти переосмислюють свої комунікаційні зусилля, все більше уваги приділяючи рекламі та просуванню освітніх послуг. Реклама закладу вищої освіти – це інформація, яка розповсюджена у будь-якій формі за допомо-

гою різноманітних засобів про навчальний заклад, його освітні послуги, призначена для певного кола осіб і призвана формувати та підтримувати інтерес до цього освітнього закладу і його освітніх послуг. Впровадження в рекламну діяльність нових інформаційних технологій створює умови для розширення засобів створення реклами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показав, що тематика в цьому напрямі раніше висвітлювалася взагалі у рекламній і маркетинговій сферах. У роботах [1–3] розглядаються особливості рекламної діяльності вищих навчальних закладів, досліджуються сучасні методики розробки рекламної кампанії, пропонуються систематизовані підходи до організації рекламної діяльності. Аналізуючи

особливості використання комунікаційних інструментів для просування послуг вищої освіти, відзначається, що найбільш традиційним інструментом комунікацій зі споживачами є реклама. Сутність реклами освітніх закладів детально розглядається у роботі [4], подається характеристика основних видів реклами, їх переваги, визначаються види реклами для закладів вищої освіти, пропонується план рекламної кампанії для освітніх закладів. Використанню соціальних мереж для просування бренду вищого навчального закладу присвячена робота [5], в якій порівняно соціальні мережі, їх можливості при просуванні брендів ВНЗ, обґрунтовано необхідність переходу до реклами в соціальних мережах, наведено перелік SMM-інструментів для кожної соціальної мережі.

**Постановка завдання.** Мета статті – розглянути найбільш популярні різновиди рекламних відеороликів, етапи їх створення, сутність відео монтажу та його види. Обґрунтувати доцільність використання програми Adobe Premiere Pro щодо розробки рекламно-інформаційних відеоматеріалів для закладу вищої освіти.

**Виклад основного матеріалу.** Специфіка реклами освітніх послуг навчальних закладів полягає в тому, що вона повинна носити в першу чергу іміджевий характер. Вища освіта, отримати яку пропонує будь-який навчальний заклад, – це продукт, який розглядається конкретно людиною вельми нечасто на відміну від будь-якого комерційного товару. Тому реклама освітніх послуг повинна бути дуже інформативною, комплексною, розрахованою на створення довіри, яка має об'єктивний характер, що створює враження відкритості і повноти.

Рекламуванням своїх послуг займаються і державні, і недержавні, і давно існуючі, і тільки створені вищі навчальні заклади, для чого використовуються: засоби масової інформації (пряма і непряма друкована реклама, телевізійна реклама, реклама в пресі, а саме: діловий і молодіжний, радіореclama), зовнішня реклама, реклама на транспорті, виставкова діяльність, дні відкритих дверей, ювілейні чи пам'ятні дати як самого навчального закладу, так і його найшановніших співробітників; зустрічі та асоціації випускників, клуби почесних докторів, наукові конференції, симпозиуми тощо [1].

Телевізійна реклама є одним із поширених засобів передавання рекламних звернень. Перевагами такої реклами є одночасний візуальний і звуковий вплив, миттєвість передавання, що дозволяє контролювати момент отримання звернення,

можливість обирати конкретну цільову аудиторію в різноманітних тематичних програмах, а також достатньо велика аудиторія охоплення. В телеєфірі можна також розміщувати новини ЗВО, їх досягнення та іншу інформацію.

В наш час Інтернет-технології стрімко розвиваються та використовуються у всіх сферах діяльності. Майже всі навчальні заклади мають власні веб-сайти. Тому найпоширенішою є електронна реклама – вид рекламно-інформаційної роботи, що являє собою розміщення рекламно-інформаційних матеріалів у мережі Інтернет: на власному офіційному сайті навчального закладу, на інших освітніх сайтах, у соціальних мережах, розсилка рекламних об'яв по електронній пошті.

Електронні комунікації вищого навчального закладу, як правило, включають чотири напрями діяльності – створення і управління корпоративним сайтом, організація рекламних кампаній в Інтернет-мережі, співробітництво та розміщення різноманітної інформації на галузевих порталах, Mobile та Internet-маркетинг, SMM (соціальний медіа-маркетинг) – робота у соціальних мережах [6].

Найбільш наочно, поширено, яскраво, вдало можна представити необхідну інформацію за допомогою інформаційних відеороликів, які останнім часом є найпопулярнішим засобом реклами.

Рекламні відеоролики можна поділити на різновиди. Виділимо наступні:

1) комбінована реклама – це один-два формату подачі візуального матеріалу, мультиплікації, комп'ютерної графіки спільно з живою відеозйомкою. Така комбінація сприяє створенню попиту на продукт або послугу, ефективніше доносить інформацію;

2) презентаційний ролик – своєрідна візитна картка, в ньому висвітлюються принципи роботи певної фірми. Якщо представляється товар, такий ролик можна назвати оглядовим відео, увага приділяється споживчим властивостям і характеристикам; якщо розповідається про підприємство, ролик знімають у форматі фільму-екскурсії;

3) технологічний фільм – це ролик, в якому демонструється виробничий або спеціальний технологічний процес, пояснюється робота складних систем. Технологічний фільм створюють майже завжди для внутрішнього корпоративного застосування. Це пов'язано з використанням професійної етики, термінології, даних, які часто незрозумілі непідготовленому глядачеві.

4) відеоролик про компанію – фільм, що показує культуру і філософію фірми в обмеженому за

хронометражем варіанті. Застосовується для розповіді про унікальність певної послуги. На офіційних сайтах компаній такий відеоролик можна побачити в розділі типу «Про нас».

5) відеоогляд – відео про послугу, відеокаталог. Найчастіше замовники такого відео – інтернет-магазини.

Створення відеоролику можна поділити на декілька етапів.

Процес виробництва відео багатогранний і включає в себе безліч етапів, основні з них такі: 1) препродакшн (це етап підготовки до знімального процесу, включаючи написання сценарію, підбір акторів, розкадрування та таке інше); 2) продакшн (сам знімальний процес); 3) постпродакшн (обробка відзнятого матеріалу, монтаж, озвучування, комп'ютерна графіка і спецефекти, титри, кольорокорекція тощо).

На першому етапі головним є написання сценарію відеоролика – структурованого документа, на який буде орієнтуватися вся знімальна група і команда постпродакшну. Ідея, концепція і основа для графічної візуалізації – три фактори, які формуються в процесі створення сценарію. Препродакшен – це підготовчий передзйомний період, який триває до початку зйомок.

Другий етап – продакшен – це повний художній процес створення відеоролика, що включає процес організації, визначення техніки і технології створення фільму. Цей етап включає в себе підготовку до відеозйомок на місці і безпосередньо зйомку. Сюди входить навчання знімальної групи, побудова декорацій, робота з акторами. Залежно від складності відеоролика змінюється склад знімальної групи, кількість знімальних днів, складність декорацій та інші аспекти.

Третій етап – постпродакшен – заключний етап створення ролика, що означає роботу після зйомок ролика. Це комплекс робіт зі створення відео шляхом обробки і редагування відзнятого відеоматеріалу, тобто здійснюється монтаж, озвучення, накладення спецефектів та інші необхідні дії і (або) створення відео за допомогою комп'ютерної графіки та анімації. В результаті виходить повністю готовий відеоролик.

Створення реклами, зокрема, рекламного відеоролику, являє собою складний, творчий процес. Звичайно, що для створення більшості засобів реклами доцільно залучати професійних фахівців з реклами (дизайнери, художники, режисери, автори текстів, психологи), послуги яких достатньо високі або працівників маркетингових відділів, якщо такі є в структурі навчального закладу [7].

Але, якщо це можливо, то можна розробити відеоролики без залучення професійних фахівців, студентами вищих навчальних закладів сумісно з викладачами.

Для роботи з відеороликами і повноцінними фільмами власного виробництва існують програми для монтажу відеороликів.

Відеомонтаж – це редагування відзнятого відеоряду, в результаті якого виходить відеоролик. Основною задачею відеомонтажу є видалення непотрібних фрагментів відео, стикування окремих елементів відеоматеріалу, створення переходів між ними, додавання спецефектів та пояснювальних титрів.

Розрізняють три види відеомонтажу: лінійний, нелінійний і гібридний. Лінійний монтаж – це монтаж, який відбувається в реальному часі. При нелінійному монтажі відео перетворюють в цифрову форму, після його ділять на фрагменти, далі ці фрагменти записуються в потрібній користувачеві послідовності, в потрібному форматі на обраний відеоносій. При цьому в кінцевий файл може потрапити не весь вихідний відеоматеріал, він може бути частково обмежений. Нелінійний монтаж здійснюється за допомогою спеціальних комп'ютерних програм – відеоредакторів. Одне з важливих достоїнств нелінійного монтажу – це непотрібність повного перезапису кінцевого відеофайлу для роботи з ним (зміни послідовності, урізання або видалення непотрібних частин запису). Гібридний монтаж поєднує в собі переваги лінійного та нелінійного монтажу (нелінійна відеомонтажна система виступає в ролі відеоджерела). Останнім часом нелінійний монтаж практично витіснив з нашого життя інші види відеомонтажу.

Для створення відео існує величезна кількість відеоредакторів, а також є чимало простих програм для створення відео онлайн. Існуючі відеоредактори відрізняються за функціоналом, зовнішньому оформленню, розраховані на користувачів з різним рівнем знань. Програми являють собою набір функцій і інструментів, що дозволяють застосовувати спецефекти, накладати музику та коригувати кадри. Вибір тієї чи іншої програми залежить від особистого професіоналізму та вимог, що висуваються до кінцевого результату. Вибрати кращу програму для редагування відео з існуючого різноманіття практично неможливо. Кожен фахівець особисто для себе вирішує, який редактор підходить йому більше за інших. Будь-який додаток має свої особливості, які накладають відбиток на весь робочий процес.

Найбільш популярні програмні засоби для створення відео: Movavi Video Editor; Adobe Premiere Pro; VideoPad Video Editor; Sony Vegas; Pinnacle VideoSpin. Оглянемо коротко деякі з цих програм.

Movavi Video Editor. Це умовно-безкоштовна програма для обробки відео і нелінійного монтажу роликів і повноцінних фільмів. Можливо замінювати кадри і міняти їх місцями на будь-якому етапі робочого процесу. Це російський продукт, який складає гідну конкуренцію закордонним аналогам. Основні можливості: монтаж повноцінних роликів з картинок, фотографій і короткометражних нарізок; коригування аудіо; поліпшення якості відео; оцифровка записів тощо. Редактор відрізняється простим і інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, зручний як для досвідчених майстрів, так і для новачків. Недоліком софту є обмеженість пробного періоду, безкоштовне використання можливо тільки протягом тижня.

VideoPad Video Editor. Це дуже компактна і зручна програма, що дозволяє монтувати фільми, кліпи і додавати всілякі деталі у відео. В її арсеналі більше 50 різних ефектів, можливість запису голосових коментарів і додавання титрів. До основних переваг редактора відносяться: підтримка більшості відомих форматів відео, аудіо та зображень; можливість самостійного запису голосових повідомлень, що дуже зручно для створення презентацій або навчальних відео; можливість створення дуже якісних відеороликів в домашніх умовах, а також коригування якості вже існуючого відео. Програма має деякі недоліки: інтерфейс англійською мовою, безкоштовна версія 14 днів. Тому необхідна наявність певних навичок, що дуже ускладнює її використання новачками.

Sony Vegas. Це дуже поширена програма серед тих, хто займається професійною обробкою відео. Має практично безмежний функціонал, що дозволяє втілювати в реальність навіть найскладніші проекти. Серед достоїнств редактора виділяються: простий і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що значно спрощує і скорочує робочий процес; висока швидкість роботи; безліч можливостей. Недоліки: дорога ліцензія; необхідність навчання, новачкові буде складно освоїти роботу в редакторі.

Pinnacle VideoSpin. Програма одна з найбільш простих і ефективних. За допомогою редактора можна змонтувати якісний відеокліп або створити ролик на основі наявних фотографій або картинок. Переваги: просте і інтуїтивно зрозуміле управління; можливість додавання всіляких ефектів, в

тому числі титрів, голосу або плавних переходів; редактор безкоштовний. Головним недоліком є неможливість створення відеороликів тривалістю понад годину.

Для створення відеоматеріалів в якості кращого інструменту нами було обрано Adobe Premiere Pro CC – професійну програму для нелінійного монтажу відеороликів. Це найкраща з програм, яка використовується фахівцями. Редактор відмінно підходить для роботи над повноцінними відеофільмами. Головними перевагами є: інтуїтивно зрозумілий і простий інтерфейс, позбавлений зайвих кнопок і шкал, які можуть заплутати новачка; функціональність, що дозволяє працювати над відеороликами як за допомогою миші, так і клавіатури; наявність «гарячих» клавіш дозволяє виконувати широкий спектр дій без зайвих витрат часу; стабільність, за рахунок чого Adobe Premiere є практично єдиною програмою, яка захищена від несподіваного «зависання». Завдяки зручності і простоті, редактор здатний задовольнити потреби як професіоналів, так і новачків. Програма вимагає наявності певних навичок, освоїти які можна в найкоротші терміни. Суттєвою перевагою програми є її вільна інтеграція з іншими продуктами Adobe. Більшість професіоналів використовують зв'язку Premiere Pro + After Effects + Photoshop. Така зв'язка програм вирішує практично всі завдання, з якими може зіткнутися професіонал або простий аматор.

У процесі навчання студентами Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії (м. Бахмут) розроблено рекламно-інформаційні відеоматеріали, які було використано також і для проведення рекламної кампанії ЗВО. Деякі з них:

- відеоролик для конкурсу «Кращий студент року» учасниці конкурсу. У ролик зібрано основні моменти під час навчання та громадської діяльності фігуранта конкурсу;

- відеоролик з приводу 55-ти річчя Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії (ННППІ УІПА). Відеоматеріал створений за допомогою історичних довідок, деяка частка матеріалу була відзнята знімальною групою для порівняння життя інституту протягом 55 років його існування;

- відеоролик для конкурсу «Бути студентом – це круто!». У відеоролику проілюстроване життя звичайного студента. Відеоматеріал зайняв перше місце у конкурсі;

- відеоролик до всесвітнього дня боротьби із ВІЛ та СНІД. Відеоматеріал підготовлений





а



б

Рис. 1. Фрагменти відеороликів: «Візитка ЗВО» (а); «День здоров'я» (б)

творчою групою ННППІ УПА для привернення уваги до проблем життя людей із діагнозом ВІЛ та СНІД;

- відеоролик-реклама для вступної кампанії ННППІ УПА. Відеоматеріал містить у собі всю необхідну абітурієнтам інформацію щодо вступу до ННППІ УПА (рис. 1 а);

- відеоролик до загальноміського дня здоров'я. У відео показані кадри змагань під час загальноміського дня здоров'я (рис. 1 б);

- відеоролик про проведення форуму студентського самоврядування «Студентський світ без кордонів». Відео містить матеріал, який було відзняте під час проведення форуму студентського самоврядування, показано основні моменти проведення форуму;

- відеоролик для конкурсу «Візитівка Бахмуту». Відеоматеріал для участі у цьому конкурсі відзнятий та оброблений творчою групою ННППІ УПА. Ролик представляє промислову, духовну, спортивну та багато інших сфер життя міста.

Робота по створенню нових відеороликів продовжується. За допомогою цього виду реклами постійно поновлюється інформація на власному сайті ННППІ УПА, у соціальних мережах, зокрема, у соцмережі Facebook. Впровадження розроблених інформаційних відеороликів для рекламної кампанії навчального закладу має допомогти потенційному абітурієнту отримати своєчасну і необхідну інформацію щодо вибору майбутнього напрямку навчання у закладі вищої освіти.

**Висновки.** У сучасних умовах використання витрат на рекламну кампанію закладу вищої освіти доцільно привернути увагу на створення рекламних відеороликів із залученням студентів. Вдало проведена рекламно-інформаційна кампанія навчального закладу дозволить не лише залучити більше нових споживачів освітніх послуг, а й дозволить в подальшому скоротити час завоювання їх довіри, досягати успіху в конкуренції, стимулювати привабливість освітніх заходів та підтримувати постійний інтерес до діяльності закладу.

#### Список літератури:

1. Телетов О.С., Провозін М.В. Рекламна діяльність вищого навчального закладу. *Маркетинг і менеджмент інновацій*. 2011. № 2. С. 53–64.
2. Євсейцева О.С., Кретова Д.В. Дослідження особливостей методики розробки рекламної кампанії вищого навчального закладу. *Ефективна економіка*. 2017. № 4.
3. Сасенко О.О. Аналіз використання комплексу маркетингових комунікацій у просуванні освітніх послуг ВНЗ III-IV рівня акредитації. *Вісник Східноєвропейського університету економіки і менеджменту*. 2012. Випуск 1(11). С. 169–178.
4. Семенюк С.Б. Планування рекламної кампанії закладів вищої освіти. *Галицький економічний вісник*. 2015. Том 48. № 1. С. 155–161.
5. Сорочан Д.В. Використання вищим навчальним закладом інструментарію SMM для просування власного бренду. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія Економічні науки*. 2014. Випуск 5. Частина 3. С. 57–60.
6. Репіч Т.А. Роль соціальних мереж у просуванні освітніх послуг. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2015. Том 21. № 4. С. 178–185.
7. Махиня Т.А. Рекламно-інформаційна діяльність як складова професійної діяльності сучасного менеджера освіти. *Електронний науково-практичний журнал «Науковий вісник УМО. Серія. Педагогіка»*. 2017. Випуск 3.

**Zaluzhna G.V., Nefodova I.V. DEVELOPMENT OF INFORMATION VIDEOS FOR THE ADVERTISING CAMPAIGN OF HIGHER EDUCATION**

*The article considers the essence and specifics of advertising of higher education institutions, modern means of advertising educational services. All educational institutions advertise their services, for which mass media, outdoor advertising, exhibition activities, open days, scientific and practical conferences, etc. are used. In modern conditions, the most common is electronic advertising - a type of advertising and information work, which is the placement of advertising and information materials on the Internet: on its own official website, on other educational sites, on social networks, sending advertisements by e-mail. It is determined that one of the most common means of advertising is informational videos. Creating a promotional video is a complex, creative process. The article considers the most popular types of promotional videos, stages of their creation: pre-production, production, post-production. The essence of video editing is considered, its types are characterized. There are currently a huge number of video editors for video creation, and there are many simple programs for creating video online. These editors differ in functionality, appearance, they are designed for users with different levels of knowledge. A brief overview of some of the existing popular video creation programs is provided: Movavi Video Editor, VideoPad Video Editor, Sony Vegas, Pinnacle VideoSpin. The advantages and disadvantages of these video editors are highlighted. It is almost impossible to choose the best video editing program from the existing variety. Each specialist personally decides for himself which editor suits him best than others. The choice is substantiated and the main advantages of the professional program for nonlinear editing of videos are allocated Adobe Premiere Pro CC. With the help of this program, students of the together with teachers developed advertising and informational videos. The list of developed materials for the advertising campaign of the higher education institution is presented. In modern conditions of using the costs of the advertising campaign of the institution of higher education, it is advisable to draw attention to the creation of informational videos with the involvement of students.*

**Key words:** higher education institution, advertising campaign, informational videos, development, video editing.

**Конциур В.О.**

Одеський національний політехнічний університет

**Беглов К.В.**

Одеський національний політехнічний університет

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ ГРУПИ КОТЛІВ ПІД ЧАС СПАЛЮВАННЯ НЕСЕРТИФІКОВАНОГО ПАЛИВА

Використання біогазу є одним із перспективних напрямів розвитку енергетики України, але заміна природного газу на біогаз викликає низку проблем під час експлуатації теплогенеруючого обладнання. Основною проблемою є коливання складу газу, що йде на горіння. Через різний склад газу відбуваються значні коливання витрат повітря та, як наслідок, змінюються властивості газоповітряного тракту й теплообмінних процесів.

Дослідження зі спалювання біопалива в котельних установках проводяться досить давно. Уже створено й експлуатується багато котельних установок, які використовують як основне паливо біогаз чи рідке біопаливо. Проте ті котли, що експлуатуються, уже розраховані на спалювання біогазу, причому вважається, що склад палива не змінюється.

Від сучасних АСУ ТП необхідна надійна адаптація до зміни середовища їх використання за відсутності або мінімального втручання оператора під час їх функціонування. Сучасний рівень розвитку теорії оптимального управління й теорії адаптивних систем АСУ дає змогу вирішити нове завдання управління технічними структурами не лише за параметрами, а й за структурою взаємозамінного устаткування системи, яке відрізняється своєю надійністю, ефективністю й вартістю.

У статті розглянуто автоматизовану систему управління потужністю групи котлів. Використано математичну модель спалювання несертифікованого газоподібного палива, у якій урахується нелінійна залежність між кількістю тепла, що подається до топкового пристрою, і кількістю тепла, що сприймається теплоносієм, залежно від умов теплопередачі, спричинених значними коливаннями витрати димових газів.

Ця нелінійна модель далі використовується для визначення найкращого способу навантаження кожного котла з групи, що працюють на загального споживача, який забезпечує найбільше значення сумарного ККД котельні, а також для дослідження зміни експлуатаційних витрат котельні під час роботи на частковій потужності кожного з агрегатів.

Для пошуку мінімуму цільової функції використано модифікований симплекс метод. Моделювання динамічних характеристик котлів реалізовано в пакеті Simulink, а пошукова процедура реалізована у вигляді script файлу мовою Matlab. Це дає змогу оцінити час пошуку під час роботи на реальному обладнанні.

**Ключові слова:** керування, група котлів, навантаження, нелінійна модель, оптимізація, симплекс метод.

**Постановка проблеми.** Сьогодні активно ведуться дослідження з використання поновлюваних джерел енергії. Зокрема, розглядаються питання використання як палива біогазу, отриманого шляхом переробки органічних відходів сільськогосподарської діяльності. Заміна природного газу на біогаз викликає низку проблем під час експлуатації теплогенеруючого обладнання. Основною такою проблемою можна вважати значні коливання складу газу, що йде на горіння. Це викликає значні коливання витрати як палива, так і повітря, як наслідок, зміну статичних і динамічних властивостей котла [1, с. 44–52].

При спробах мінімізувати експлуатаційні витрати, а саме зменшити витрату палива, під час

роботи котельні на частковому навантаженні й спалювання несертифікованого палива доводиться відмовлятися від автоматичного регулювання та здійснювати управління в ручному режимі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Класичним методом розподілу навантаження між котлами, що працюють на загального споживача, є розподіл за найменшим відносним приростом витрати палива. Через свою класичність цей метод застосовують на багатьох енергогенеруючих підприємствах (котельних, ТЕЦ, ТЕС), він модифікований для реалізації в сучасних АСУ ТП. Але знову й знову з'являються роботи, що дають змогу підвищити якість рішень з автоматизованого управління обладнанням [2; 3; 4].

Робота [2, с. 71–77] присвячена опису програмного комплексу, що дає змогу провести керування розподілом теплового та електричного навантаження між енергоблоками. Як цільова функція обрана мінімізація витрати палива загалом по електростанції. Програмний комплекс реалізується за допомогою SCADA системи на базі сучасних обчислювальних засобів.

У статті [3, с. 25–27] наведено методику визначення годинної витрати палива на основі відносних приростів витрати палива блоку. Для вирішення завдання застосовуються числові методи. Критерієм оптимальності є умова рівності відносних приростів витрати палива для котлів, що працюють на різних потужностях.

Стаття [4, с. 15–20] присвячена аналізу алгоритмів оптимального управління виробничими й технологічними процесами, що відбуваються на енергоблоках ТЕС. Одним із висновків роботи є те, що керувати економічністю технологічного процесу за допомогою пошуку мінімуму відносного приросту витрати палива некоректно. Це зумовлено інерційністю процесів у системі «котел-турбіна-генератор». Застосування цього критерію можливе тільки для суворо стаціонарних режимів роботи обладнання без будь-яких зовнішніх і внутрішніх збурень. При нестационарних процесах у тепловому обладнанні питома витрата палива може коливатися непередбачувано й не відображає поточну економічність його роботи.

Увага проблемі змінного складу палива приділяється в праці [5, с. 108–114]. У ній обґрунтовується введення комплексного критерію оцінювання роботи ТЕС. У складі критерію пропонується використання як одного з показників зміну складу палива. Але для малих котельнь запропонована оцінка якості роботи занадто складна з огляду на малі викиди та обчислювальну потужність керувальних пристроїв.

Спалюванню біопалива в котельних установках у нинішній час також приділяється багато уваги. В експлуатації знаходиться багато котельних установок, у яких як основне палива використовують біогаз. Уже розроблені математичні моделі котлів, що враховують нелінійні властивості обладнання при глибоких збуреннях теплотворною спроможністю палива [6; 7; 8; 9; 10; 11]. Кожна із цих робіт присвячена розробленню окремого елементу математичної моделі.

Робота [6, с. 79–84] присвячена визначенню коефіцієнта теплопередачі при спалюванні газів змінного складу.

У праці [7, с. 32–36] досліджується взаємозв'язок між зміною складу палива та необхідною

площиною поверхонь теплообміну для забезпечення необхідної потужності котлоагрегату.

Ці дві роботи отримали подальший розвиток у моделях парового котла в праці [8, с. 180–185] і моделях водогрійних котлів [10, с. 132–136; 11, с. 116–121].

У роботах [9, с. 109–115; 12, с. 37–46] розглянуті загальні питання керування потужністю котельні, до складу якої входять декілька котлів.

З'ясовано, що під час оперативного управління котельним устаткуванням, а саме при збуреннях, пов'язаних зі зміною складу палива, оптимізація його роботи не відбувається. Однією з причин цього є той факт, що пошукові процедури ґрунтовані на розрахункових залежностях питомої витрати палива від навантаження котла, але в разі відхилення складу палива від розрахункового отримати вказані залежності, як показано [12], не видається можливим.

Отже, на підставі вищесказаного можна констатувати, що питання оперативного управління оптимальним розподілом навантаження між котлами, що працюють на загального споживача, з урахуванням глибоких збурень за складом палива до кінця не вирішене.

**Постановка завдання.** Мета статті – реалізувати в режимі реального часу процедуру пошуку такого розподілу навантаження між котлами, що працюють на загального споживача, що забезпечує найбільше значення сумарного ККД котельні; дослідити зміну експлуатаційних витрат котельні під час роботи на частковій потужності кожного з агрегатів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для досягнення поставленої мети використано математичну модель спалювання несертифікованого газоподібного палива шляхом урахування нелінійної зміни кількості тепла, що подається до топкового пристрою та враховує зміни умов теплопередачі при значних коливаннях витрати димових газів. Об'єктом дослідження статичних і динамічних властивостей був водогрійний водотрубний котел серії КСВа, тепла потужність якого становить 2 МВт, як один із найпоширеніших у комунальному господарстві опалювальних котельнь малої потужності. Головною відмінною рисою цих котлів є простота в експлуатації та ремонті довговічність. Котли вказаного типу можна перевести для спалювання одного виду палива на інше. Основним видом палива, відповідно до виробничої лінійки, є мазут, газ, тверде паливо.

Зазвичай з погляду управління навантаженням водогрійний котел вважається лінійним об'єктом



керування. Але при спалюванні несертифікованого палива, наприклад, біогазу, збурення за складом палива й, відповідно, за теплотворною спроможністю палива мають такі значення, що, як показано в роботі [9, с. 109–115], котел має нелінійні властивості.

У праці [10, с. 132–136] виявлено, що в разі збільшення теплотворної спроможності палива в десять разів температура води після котла зросла не в 10 разів, як це прогнозує лінійна модель, а лише в 5 разів. Тобто коефіцієнт передачі по каналу «теплотворна спроможність – температура води після котла» зменшився в 2 рази порівняно зі значенням під час роботи на базовому паливі.

На рисунку 1 наведено схему реалізації розглянутої моделі водогрійного котла.

Входами моделі є  $dQ$  – відхилення теплотворної спроможності палива,  $Q_{nom}$  – номінальне значення теплотворної спроможності палива (номінальним прийняте значення для природного газу),  $G_f$  – відхилення витрати палива,  $G_a$  – відхилення витрати повітря,  $t_{in}$  – відхилення температури води на вході в котел. Крім того, прийнято, що регулятор економічності підтримує необхідну витрату повітря  $G_a$  не залежно від витрати палива чи його складу. Вихідним параметром моделі є температура води на виході з котла.

Схему доповнено розрахунком ККД котла залежно від його потужності. Як показано в праці [12, с. 37–46], залежність ККД котла від

його навантаження може бути описана квадратичною залежністю:

$$\eta(N) = c_1 (N - N_{max})^2 + c_2 \quad (1)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  – константи.

Визначимо значення  $c_1$  і  $c_2$  виходячи з умов:  $\eta(N_{max}) = \eta_0$  – при максимальному навантаженні ККД дорівнює максимальному (розрахунковому) значенню,  $\eta(0) = 0$  – при нульовому навантаженні ККД також дорівнює нулю.

Склавши й вирішивши систему рівнянь, отримаємо значення коефіцієнтів:

$$c_1 = \frac{\eta_0}{N_{\max}^2}; c_2 = \eta_0.$$

Тоді (1) можна записати у вигляді:

$$\eta(N) = \frac{\eta_0}{N_{max}^2} (N - N_{max})^2 + \eta_0 \quad (2)$$

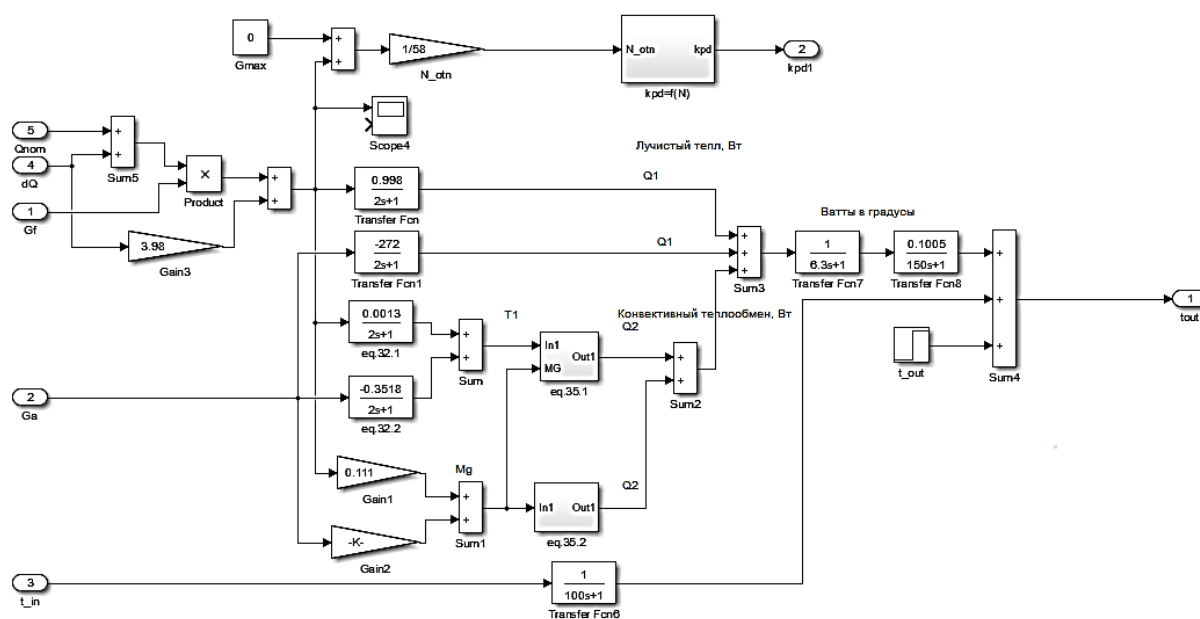
або

$$\eta(v) = \eta_0 (2v - 2v^2),$$

де  $v$  — відносна потужність.

Числові значення для математичної моделі отримані з технічних характеристик і теплового розрахунку котла.

Для визначення найкращого навантаження кожного котла пропонується використовувати цільову функцію, що враховує сумарний ККД декількох котлів, а саме вираз:



**Рис. 1. Структурна схема моделювання водогрійного котла**

$$I(\eta) = -\sum_{j=1}^n (a_j \eta(v_j)), \quad (3)$$

де  $n$  – кількість котлів,  $a_j$  – ваговий коефіцієнт для  $j$ -го котла.

За допомогою вагових коефіцієнтів можна надати перевагу тому чи іншому котлу, наприклад, урахувати надійність роботи. Тобто котел має більший ККД серед інших, але його не варто включати в роботу на повне навантаження через ненадійну роботу насосу чи вентилятора.

Метою роботи АСР є мінімізація функції  $I$ , а саме експлуатаційних витрат під час роботи на частковій потужності кожного з агрегатів.

Для реалізації процедури пошуку пропонується використовувати модифікований симплекс метод (Нелдера-Міда), тому що він не вимагає знаходження похідної функції, що мінімізується. Також порівняно з градієнтними методами симплекс метод вимагає меншої кількості точок розрахунку. Так, для функції двох змінних на одному кроці розрахунку градієнтним методом потрібно визначити значення функції, як мінімум, у чотирьох точках, для симплекс методу треба визначити функцію в трьох точках.

Алгоритм розрахунку оптимальних значень навантаження котлів зроблено за допомогою дже-

рела [12, с. 37–46] і реалізовано в пакеті Matlab. Причому робота обладнання з обчисленням значень  $\eta$  і  $I(\eta)$  моделювалася в пакеті Simulink, а обчислювальна пошукова процедура виконувалася шляхом виклику функції з командного рядка Matlab. Отже, враховані динамічні властивості котлів і перехідні процеси, викликані зміною завдань регуляторам.

Під час керування навантаженням водогрійного котла параметром, який регулюється, є температура води після котла. Щоб отримати значення навантаження можна, скористатися таким виразом:

$$Q = M_B \cdot c_p \cdot (t_{out} - t_{in}), \quad (4)$$

де  $M_B$  – витрата води через котел;  $c_p$  – теплоємність теплоносія (води);  $t_{in}$  – температура води на вході в котел;  $t_{out}$  – температура води після котла.

Отже, при постійній температурі на вході в котел навантаження пропорційно температурі, яка регулюється, й навпаки. Входом керування є витрата палива.

Схема моделювання показана на рисунку 2.

Для дослідження АСР прийняті такі початкові умови:

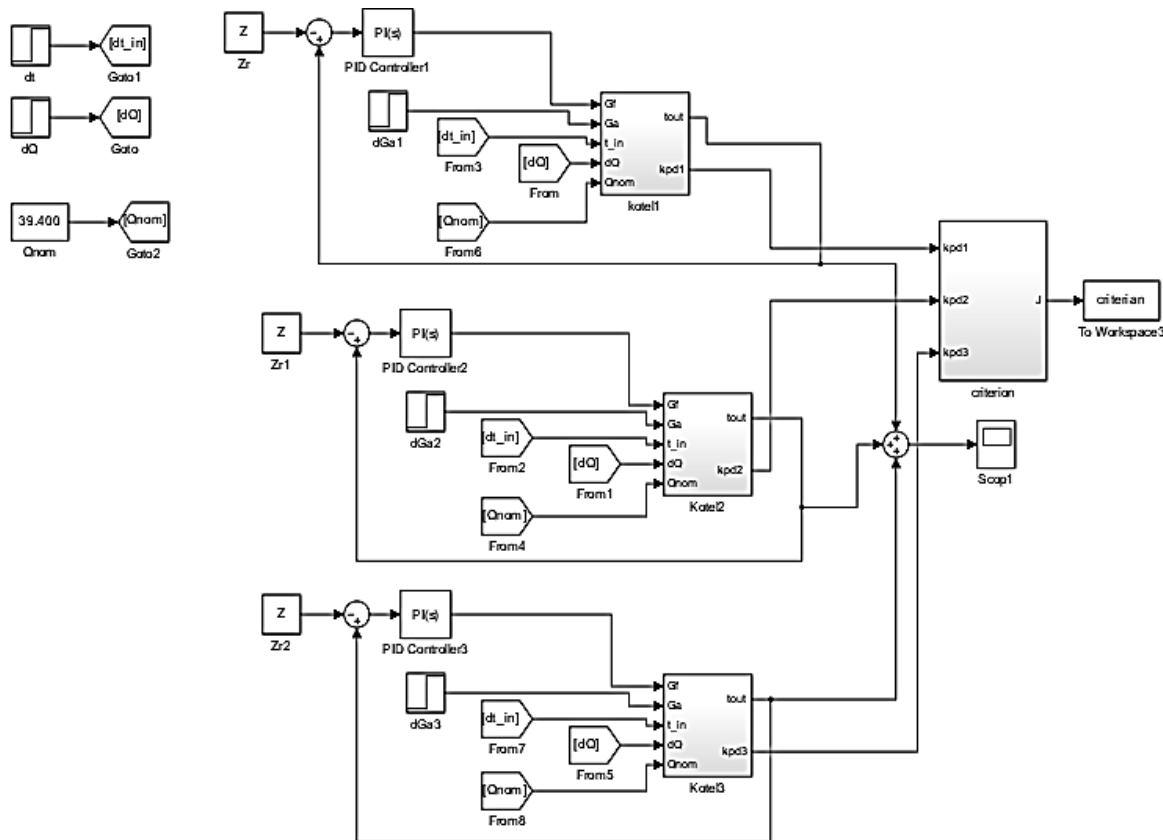


Рис. 2. Схема моделювання паралельної роботи трьох однотипних котлів

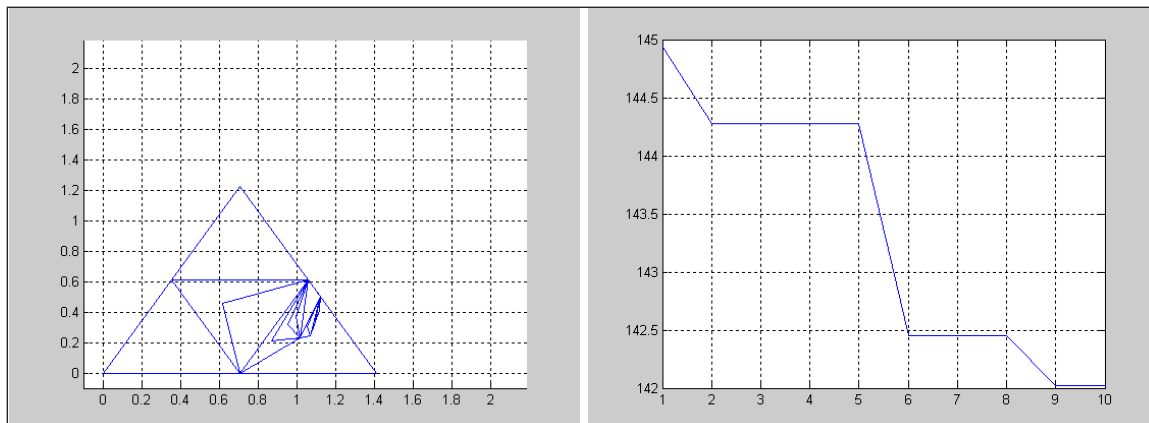


Рис. 3. Ілюстрація роботи пошукового методу:  
а) ілюстрація пошуку симплекс методом; б) зміна сумарних витрат

- температура теплоносія на вході – 60 С;
- температура теплоносія на виході не більше ніж 115 С і залежить від необхідного навантаження;
- у котельні встановлено три котла з максимальними тепловими потужностями – 1 МВт, 2 МВт, 3 МВт;
- потужність, яку необхідно підтримувати, дорівнює 55% від максимального навантаження, тобто 3,3 МВт.

З початку розрахунку для забезпечення потужності котли були навантажені так: котел № 3 як найпотужніший – на 100%, котел № 2 – на 0% (вимкнений), котел № 1 – на 30%.

Результати моделювання зведено в таблицю 1.

Таблиця 1

#### Результати моделювання

		Котел 1	Котел 2	Котел 3
	Ннач отн, %	30,0	0,0	100,0
Знач=145	Ннач абс, МВт	0,300	0,0	3,000
Зопт=142	Нопт отн, %	83,50	53,75	46,33
	Нопт абс, МВт	0,835	1,075	1.390

Ілюстрація роботи пошуку симплекс методом наведена на рисунку 3а, змінення вартості експлуатації – на рисунку 3б.

**Висновки.** У роботі розглянуто математичну модель водогрійного котла, у якому спалюється несертифіковане газоподібне паливо. З погляду регулювання потужності такий котел має нелінійні статичні й динамічні властивості.

Для поєднаної моделі з трьох котлів різної потужності застосовано метод деформованого симплексу з метою пошуку такого розподілення навантаження котлів, яке забезпечує мінімальну вартість експлуатації котельні на частковому навантаженні.

Під час розрахунків цільової функції враховувалася тривалість перехідних процесів керування, тобто можна вважати, розрахунок проводився в режимі реального часу.

Так як процедура пошуку реалізована у вигляді програми мовою Matlab, то її можна використати для програмування вільно програмованих контролерів.

#### Список літератури:

1. Mathematical model of non-certified burning fuels / M.V. Maksimov, V.F. Lozhechnikov, T.S. Dobrovolskaya, A.V. Bondarenko. *East European journal of advanced technologies*. 2014. Vol. 2. № 8 (68). P. 44–52. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/22420/21760>.
2. Програмний комплекс розподілу навантажень ТЕЦ із складним складом устаткування, схемами відпустки тепла і електроенергії / В.А. Макарь'ян, А.Н. Черняєв, А.В. Андрюшин та ін. *Теплоенергетика*. 2013. № 5. С. 71–77.
3. Реймов К.М. Визначення критерію оптимального розподілу активного навантаження між агрегатами ТЭС. *Автоматизовані технології і виробництва*. 2016. № 2 (12). С. 25–27.
4. Аракелян Е.К., Васильєв Е.Д., Хуршудян С.Р. Проблеми сучасних автоматизованих систем управління технологічним процесом на базі програмно-технічних комплексів і можливий шлях їх рішення. *Вестник МЭИ*. 2014. № 1. С. 15–20.
5. Озерова И.П., Новіков Р.С. Обґрунтування необхідності розподілу навантажень між агрегатами ТЭС на базі комплексного критерію. *Вісті Томського політехнічного університету*. 2002. Т. 305. Вип. 2 : Праці ІІ семінару ВНЗ Сибіру і Далекого Сходу з теплофізики й теплоенергетики. Томськ, 2001. С. 108–114.

6. Brunetkin O.I., Gusak A.V. Determination of the range of change of the convective heat transfer coefficient during the burning of alternative types of gaseous fuel. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*. 2017. Vol. 2 (46). P. 79–84.
7. Brunetkin O.I., Gorban S.O. Heat transfer optimization of heat exchange surfaces of boiler equipment with decrease in consumption of combustion products. *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*. 2017. Vol. 3 (53). P. 32–36.
8. Лисюк А.В. Удосконалення АСУ барабанного котла для спалювання горючих штучних газів. *Автоматика – 2017 : матеріали XXIV Міжнародної конференції з автоматичного управління* (м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 р.). Київ, 2017.
9. Водогрійна котельня як об'єкт керування потужності / І.В. Вовк, І.Е. Дуба, Т.В. Конушбаєва, К.В. Беглов. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 29 (68). № 3 (1). С. 109–115.
10. Дуба І.Е., Беглов К.В. Моделювання водогрійних котлів при глибоких збуреннях за теплотворною спроможністю палива. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 29 (68). № 6 (1). С. 132–136.
11. Дуба І.Е., Беглов К.В. Моделювання водогрійних котлів при глибоких збуреннях за змістом палива. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. Т. 29 (68). № 6 (1). С. 116–121.
12. Лисюк А.В., Беглов К.В. Автоматизація розподілу навантаження між паралельно працюючими котлами. *Automation of technological and business processes* 9. 2017. № 3.

#### **Kontsur V.O., Beglov K.V. OPTIMIZATION OF BOILER GROUP OPERATING MODE DURING COMBUSTION OF NON-CERTIFIED FUEL**

*The use of biogas is one of the promising areas of energy development in Ukraine, but the replacement of natural gas with biogas causes a number of problems in the operation of heat generating equipment. The main problem is the fluctuations in the composition of the combustion gas. Due to the different composition of the gas, there are significant fluctuations in air flow and, as a consequence, the properties of the gas-air path and heat exchange processes change.*

*Research on the combustion of biofuels in boilers has been conducted for a long time. Many boiler plants have already been created and are in operation, using biogas or liquid biofuel as their main fuel. However, the boilers in operation are already designed to burn biogas, and it is believed that the fuel composition does not change.*

*Modern ACS TP requires a reliable adaptation to changes in the environment of their use, in the absence or minimal intervention of the operator in their operation. The current level of development of the theory of optimal control and the theory of adaptive systems ACS allows to solve a new problem of control of technical structures not only by parameters but also by the structure of interchangeable system equipment, which differs in its reliability, efficiency and cost.*

*The article considers the automated power control system of a group of boilers. A mathematical model of combustion of uncertified gaseous fuel is used, which takes into account the nonlinear relationship between the amount of heat supplied to the combustion device and the amount of heat perceived by the coolant depending on heat transfer conditions caused by significant fluctuations in flue gas consumption.*

*This nonlinear model is further used to determine the best way to load each boiler in the group, working on the total consumer, which provides the highest value of the total efficiency of the boiler, as well as to study changes in operating costs of the boiler at partial capacity of each unit. When calculating the objective function, the duration of transient control processes was taken into account. That is, we can assume that the calculation was performed in real time.*

*A modified simplex method was used to find the minimum of the objective function. Simulation of dynamic characteristics of boilers is implemented in the Simulink package, and the search procedure is implemented as a script file in Matlab. This allows you to estimate the search time when working on real equipment.*

**Key words:** control, group of boilers, load, nonlinear model, optimization, simplex method.



**Кравченко С.М.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Гришук Є.О.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Власенко О.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## МЕТОДИ КЛАСИФІКАЦІЇ МАШИННОГО НАВЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ БІБЛІОТЕКИ SCIKIT-LEARN

Об'єктом дослідження є використання різних алгоритмів класифікації під час групування результатів для моделей машинного навчання в галузі бінарної й багатокласової класифікації. У статті розглянуто вибір такого алгоритму машинного навчання, який залежить від декількох факторів, включаючи розмір даних, їх якість і різноманітність, а також розуміння, які відповіді на основі цих даних потрібні бізнесу. Через це доводиться пробувати багато різних алгоритмів, перевіряючи ефективність кожного на тестовому наборі даних, і потім вибирати кращий варіант. Зважаючи на це, потрібно вибирати серед наявних алгоритмів ті, які відповідають цьому завданню. Автори статті приділили увагу точності, часу на навчання, параметрам, даним. Тому вибір правильного алгоритму – це поєднання бізнес-потреб, специфікацій, експериментальної роботи й обліку доступного часу. Досліджено впровадження методів машинного навчання в різні сфери. Представлено процес машинного навчання, який містить такі етапи: підготовка даних, створення навчальних наборів, створення класифікатора, навчання класифікатора, складання прогнозів, оцінювання продуктивності класифікатора й настройка параметрів. Проаналізовано використання різних алгоритмів класифікації за допомогою бібліотеки Python, Scikit-learn, здійснено аналіз використання методу підбору моделі, обчислення, форматування й підготовки даних, підбрано оптимальні вхідні значення й моделі. Приведено оцінювання декількох варіантів оцінювання класифікатора. Метою роботи є дослідження бібліотеки для ефективності її практичного застосування. Представлено методи класифікації в машинному навчанні за допомогою бібліотеки Scikit-Learn. Здійснюється порівняння різних методів класифікації за допомогою Scikit-learn для моделей машинного навчання.

**Ключові слова:** машинне навчання, класифікація, оптимізація, аналіз даних, прогнозування.

**Постановка проблеми.** Існує безліч методів класифікації, які використовують різний математичний апарат і різні підходи під час реалізації [1]. Однак ефективність цих методів залежить від конкретного завдання, яке буде вирішуватися. Незважаючи на те що останнє десятиліття комерційні компанії займаються проблемою підвищення якості машинного навчання, натеper не існує методів, які могли б однозначно ефективно вирішити завдання класифікації. Тому необхідно проаналізувати застосування різних алгоритмів класифікації за допомогою бібліотеки Scikit-Learn

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Технологія машинного навчання на основі аналізу даних бере початок у 1950 році, коли почали розробляти перші програми для гри в шашки. За минулі десятиліття загальний принцип не змінився. Зате завдяки вибуховому зростанню обчис-

лювальних потужностей комп'ютерів багаторазово ускладнилися закономірності й прогнози, які створюються ними, і розширилося коло проблем і завдань, що вирішуються з використанням машинного навчання.

Останніми роками проведено велику кількість досліджень, що демонструють упровадження методів машинного навчання в різні сфери [2]. Машинне навчання використовується здебільше для вирішення проблем, які є занадто складними та потребують адаптації. Тобто це такий клас завдань, який неможливо вирішити певним чітким алгоритмом, необхідно зважати на вже отримані результати. Аналіз літературних джерел про застосування цих методів обмежується невеликою кількістю інформації.

**Постановка завдання.** Мета статті – за допомогою бібліотеки Python, Scikit-learn проаналізувати

використання різних алгоритмів класифікації, використання методу підбору моделі, обчислення, форматування й підготовки даних; підібрати оптимальні вхідні значення й моделі; дослідження бібліотеки для ефективності її практичного застосування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Завдяки машинному навчанню програміст не зобов'язаний писати інструкції, що враховують усі можливі проблеми й містять усі рішення. Замість цього, у комп'ютер (або окрему програму) закладають алгоритм самостійного знаходження рішень шляхом комплексного використання статистичних даних, із яких виводяться закономірності й на основі яких робляться прогнози.

Натепер машинне навчання дає змогу комп'ютерам навчатися розпізнавати на фотографіях і рисунках не тільки осіб, а і пейзажі, предмети, текст і цифри. Що стосується тексту, то й тут не обійтися без машинного навчання: функція перевірки граматики зараз наявна в будь-якому текстовому редакторі й навіть у телефонах. Причому враховується не тільки написання слів, а й контекст, відтінки сенсу й інші тонкі лінгвістичні аспекти. Більш того, уже існує програмне забезпечення, здатне без участі людини писати новинні статті (на тему економіки або, наприклад, спорту).

Типи завдань машинного навчання.

Усі завдання, які вирішуються за допомогою машинного навчання, належать до такої категорії (таблиця 1).

#### Приклад використання.

Завдання класифікації і регресії – це завдання навчання з учителем. Як приклад будемо представляти завдання кредитного скорингу: на основі накопичених кредитною організацією даних про своїх клієнтів можна прогнозувати неповернення кредиту. Тут для алгоритму досвід  $E$  – це наявна навчальна вибірка: набір об'єктів (людей), кожен із яких характеризується набором ознак (таких як вік, зарплата, тип кредиту, неповернення в минулому тощо), а також цільовою ознакою. Якщо цільова ознака – просто факт неповернення кредиту (1 або 0, тобто банк знає про своїх клієнтів, хто повернув кредит, а хто – ні), то це завдання (бінарної) класифікації. Якщо відомо, на скільки часу клієнт затягнув з поверненням кредиту, хочеться те саме прогнозувати для нових клієнтів, то це буде завданням регресії [2].

Класифікатор (classifier) – це система, яка вводить (як правило) вектор дискретних і/або неперервних функцій і виводить одне дискретне значення класу.

Наприклад, фільтр спаму класифікує повідомлення електронної пошти на «спам» або «не спам», і його вхідними даними може бути вектором булевих значень  $x = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_d)$ , де  $x_j = 1$ , якщо  $j$ -е слово в словнику з'являється в електронному листі, а  $x_j = 0$  в іншому випадку. Учень (learner) уводить навчальний набір (training set) прикладів  $(x_i, y_i)$ , де  $x_i = (x_{i,1}, \dots, x_{i,d})$  – це спостережуваний ввід,  $y_i$  – відповідний вихід і виводить класифікатор. Тест учня полягає в тому, чи дає цей класифікатор правильний вихід  $y_i$  для майбутніх прикладів  $x_i$  (наприклад, чи фільтр спаму правильно класифікує раніше невидимі електронні листи як спам чи не спам).

Машинне навчання проводиться за використанням різних алгоритмів, проте для всіх алгоритмів найважливішими є 3 компоненти:

– Представлення. Класифікатор повинен бути представлений за допомогою формальної мови, яку комп'ютер може обробляти. І, навпаки, вибір представлення для учня рівносильний вибору набору класифікаторів, яких він може навчитися. Цей набір називається гіпотезою простору (hypothesis space) учня. Якщо класифікатор не знаходиться в гіпотезі простору, то він не може бути вивчений.

– Оцінювання. Функція оцінювання (також звана цільова функція (objective function)) або функція оцінювання (scoring function)) потрібна для виділення хороших класифікаторів від поганих. Функція оцінювання, яка використовується всередині алгоритму, може відрізнятися від зовнішньої, яку ми хочемо оптимізувати для класифікатора, для простоти оптимізації.

– Оптимізація. Нарешті, нам потрібен метод пошуку серед класифікаторів того, який буде класифікувати найбільш швидко й правильно. Вибір методу оптимізації є ключовим елементом ефективності учня, а також допомагає визначити вибраний класифікатор, якщо функція оцінки має більше ніж один оптимум. Для нових учнів найкраще почати використовувати загальноприйняті оптимізатори, які пізніше замінюються спеціально розробленими. [4]

Класифікація є дуже великою частиною галузі, зокрема статистика й машинне навчання. Як правило, може бути розбита на 2 частини:

1. Бінарна класифікація – групування результату в одну з двох груп.
2. Багатокласова класифікація – групування результату в одну з декількох (більше двох) груп.

**Методи класифікації в машинному навчанні за допомогою бібліотеки Scikit-Learn.**

Для машинного навчання на Python написано дуже багато бібліотек. Розглянемо одну з найпопулярніших – Scikit-Learn.

Що таке Scikit-Learn?

Scikit-Learn – це Python-бібліотека, уперше розроблена David Cournapeau в 2007 році. У цій бібліотеці знаходиться велика кількість алгоритмів для задач, пов'язаних із класифікацією й машинним навчанням загалом.

Scikit-Learn базується на бібліотеці SciPy, яку потрібно встановити перед початком роботи. Scikit-Learn спрощує процес створення класифікатора й допомагає більш чітко виділити концеп-

ції машинного навчання, реалізуючи їх за допомогою зрозумілої, добре документованої й надійної бібліотеки. Вона містить низку методів, що охоплюють усе, що може знадобитися під час аналітики даних: алгоритми класифікації та регресії, кластеризації, валідації й вибір моделей. Також її можна застосовувати для зменшення розмірності даних і виділення ознак (рис. 2).

У системах машинного навчання існують входи й виходи. Те, що подається на вхід, прийнято називати ознаками. Коли ознаки подаються на входи системи машинного навчання, ця система намагається знайти збіг, помітити закономірність

Таблиця 1

## Категорії завдань

Завдання	Призначення
Регресії	Прогнозування на основі вибірки об'єктів з різними ознаками. На виході має вийти дійсне число (2, 35, 76,454 тощо). Наприклад, ціна квартири, вартість цінного паперу після півроку, очікуваний дохід магазину на наступний місяць, якість вина при сліпому тестуванні.
Класифікації	Отримання категоріальної відповіді на основі набору ознак. Має кінцеве кількість відповідей (як правило, у форматі «так» або «ні»): чи є на фотографії кіт, чи є зображення людським обличчям, хворий пацієнт раком. Застосовується в маркетингу під час оцінювання кредитоспроможності позичальників, визначення лояльності клієнтів, розпізнавання образів, медичної діагностики та в багатьох інших сферах.
Кластеризації	Розподіл даних на групи: поділ усіх клієнтів мобільного оператора за рівнем платоспроможності, зарахування космічних об'єктів до тієї чи іншої категорії (планета, зірка, чорна діра тощо).
Зменшення розмірності	Зведення великої кількості ознак до меншого (зазвичай 2–3) для зручності їх подальшої візуалізації (наприклад, стиснення даних).
Виявлення аномалій	Виявлення аномалій від стандартних випадків. На практиці таким завданням є, наприклад, виявлення шахрайських дій з банківськими картами.

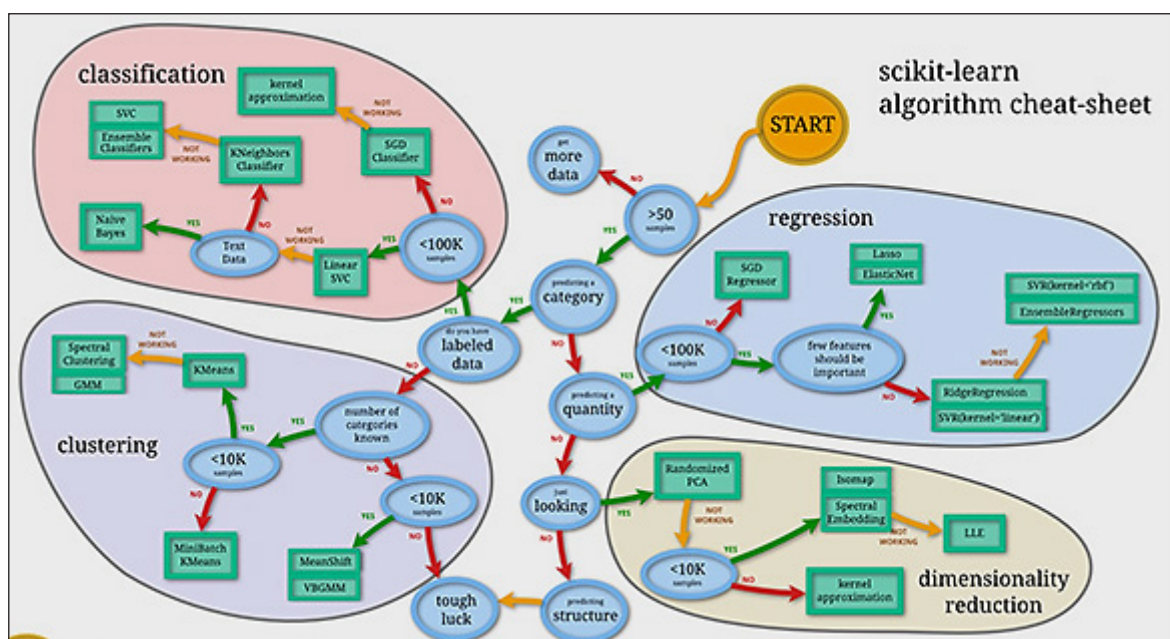


Рис. 1. Scikit-learn. Алгоритми

між ознаками. На виході генерується результат цієї роботи [3].

Цей результат прийнято називати міткою, оскільки у виходів є деяка помітка, яка видається системою, тобто прогнозування того, у яку категорію попадає вихід після класифікації.

Scikit-Learn надає доступ до різних алгоритмів класифікації. Основні з них:

- метод k-найближчих сусідів (K-Nearest Neighbors);
- метод опорних векторів (Support Vector Machines);
- класифікатор дерева рішень (Decision Tree Classifier) / случайный лес (Random Forests);
- наївний байєсівський метод (Naive Bayes);
- лінійний дискримінантний аналіз (Linear Discriminant Analysis);
- логічна регресія (Logistic Regression);

Приклади завдань класифікації

Завдання класифікації – ця будь-яке завдання, де потрібно визначити тип об'єкта з двох і більше наявних класів. Такі завдання можуть бути різними: визначення, кішка на зображенні або собака, або визначення якості вина на основі його кислотності й умісту алкоголю.

Залежно від завдання класифікації можна використовувати різні типи класифікаторів. Наприклад, якщо класифікація містить якусь бінарну логіку, то до неї найкраще підійде логістична регресія.

#### Процес машинного навчання

Процес містить у собі такі етапи: підготовка даних, створення навчальних наборів, створення класифікатора, навчання класифікатора, складання прогнозів, оцінювання продуктивності класифікатора й настройка параметрів.

По-перше, потрібно підготувати набір даних для класифікатора: перетворити дані в коректну для класифікації форму й обробити будь-які аномалії в цих даних. Відсутність значень у даних або будь-які інші відхилення – усі їх потрібно

обробити, інакше вони можуть негативно впливати на продуктивність класифікатора. Цей етап називається попередньою обробкою даних (Data preprocessing).

Наступним кроком буде поділ даних на навчальні й тестові набори. Для цього в Scikit-Learn існує відмінна функція `train_test_split`.

Як уже сказано вище, класифікатор повинен бути створений і навчений на тренувальному наборі даних. Після цих кроків модель уже може робити прогнози. Порівнюючи свідчення класифікатора з фактично відомими даними, можна робити висновок про точність класифікатора.

Найімовірніше, потрібно буде «коригувати» параметри класифікатора, поки не буде досягнуто бажаної точності, так як малоймовірно, що класифікатор буде відповідати всім вимогам із першого ж запуску [4].

Оцінювання класифікатора: існує декілька варіантів оцінювання:

- Точність класифікації.

Точність класифікації вимірювати найпростіше, і тому цей параметр найчастіше використовується. Значення точності – це число правильних прогнозів, поділене на число всіх прогнозів або, простіше кажучи, ставлення правильних прогнозів до всіх.

Хоча цей показник і може швидко дати явне уявлення про продуктивність класифікатора, його краще використовувати, коли кожен клас має хоча б приблизно однакову кількість прикладів. Так як таке буде траплятися рідко, рекомендується використовувати інші показники класифікації.

- Логарифмічні втрати.

Значення логарифмічних втрат (логлос) показує, наскільки класифікатор «упевнений» у своєму прогнозі. Логлос повертає ймовірність належності об'єкта до того чи іншого класу, підсумовуючи їх, щоб дати загальне уявлення про «впевненість» класифікатора.

```
In [21]: from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier

In [22]: x = known_values[['free', 'super', 'source']]
          y = known_values['phone_type']

In [23]: model = RandomForestClassifier(n_estimators = 100)
          model = model.fit(x, y)

In [25]: sample_user = [1, 6, 0]
          model.predict([sample_user])
```

Рис. 2. Проста класифікація з використанням моделі «випадковий ліс» у Scikit-learn



Цей показник лежить у проміжку від 0 до 1 – «зовсім не впевнений» і «повністю впевнений» відповідно. Логос сильно падає, коли класифікатор сильно «впевнений» у неправильній відповіді.

– Площа ROC-кривою (AUC).

Такий показник використовується тільки при бінарній класифікації. Площа під ROC-кривою становить здатність класифікатора розрізняти підходящі й не відповідні якому-небудь класу об'єкти.

Значення 1.0: уся область, яка потрапляє під криву, являє собою ідеальний класифікатор. Отже, 0.5 означає, що точність класифікатора відповідає випадковості. Крива розраховується з урахуванням точності й специфічності моделі. Детальніше про розрахунки можна прочитати тут.

– Матриця неточностей.

Матриця неточностей (англ. Confusion Matrix) – це таблиця або діаграма, що показує точність прогнозування класифікатора щодо двох і більше класів. Прогнози класифікатора знаходяться на осі X, а результат (точність) – на осі Y.

У міру накопичення досвіду буде простіше вибирати відповідний тип класифікатора. Однак хорошою практикою є реалізація декількох відповідних класифікаторів і вибір найбільш оптимального й продуктивного.

Scikit-learn становить широкий спектр алгоритмів машинного навчання, як контрольованих, так і неконтрольованих, із використанням узгодженого, орієнтованого на завдання інтерфейсу, що дає змогу легко порівнювати методи для цієї заяви. Оскільки він спирається на наукову екосистему Python, його можна легко інтегрувати в додаток поза традиційним діапазоном статистичного аналізу даних. Важливо відзначити, що алгоритм, реалізований мовою високого рівня, може використовуватися як будівельні блоки для підходів, специфічних для використання, наприклад, у медичній візуалізації (Michel et al., 2011). Майбутня робота включає в себе онлайн навчання, масштабування до великих наборів даних.

**Висновки.** Машинне навчання в scikit-learn полягає в тому, щоб імпортувати правильні модулі й запустити метод підбору моделі. Складніше вичистити, відформатувати й підготувати дані, а також підібрати оптимальні вхідні значення та моделі. Тому перш ніж узятися за scikit-learn, потрібно, по-перше, відпрацювати навички роботи з Python і Pandas, щоб навчитися якісно готувати дані, а по-друге, освоїти теорію й математичну основу різних моделей прогнозування та класифікації, щоб розуміти, що відбувається з даними під час їх застосування.

#### Список літератури:

1. Rao C., Govindaraju V. Handbook of Statistics: Machine Learning: Theory and Applications, 2013. 552 с.
2. Введение в машинное обучение с помощью Python и Scikit-Learn. URL: <https://habr.com/ru/company/mlclass/blog/247751/> (дата звернення: 20.05.2020).
3. Классификация в Python с Scikit-Learn и Pandas. URL: <https://stackabuse.com/classification-in-python-with-scikit-learn-and-pandas/> (дата звернення: 17.05.2020).
4. Обзор методов классификации в машинном обучении с помощью Scikit-Learn. URL: <https://tproger.ru/translations/scikit-learn-in-python/s://stackabuse.com/classification-in-python-with-scikit-learn-and-pandas/> (дата звернення: 10.05.2020).

#### Kravchenko S.N., Grishkun E.O., Vlasenko O.V. CLASSIFICATION METHODS FOR MACHINE LEARNING USING THE SCIKIT-LEARN LIBRARY

*The object of the research is to use different classification algorithms when grouping results for machine learning models in the field of binary and multiclass classification. The paper discusses the choice of such a machine learning algorithm, which depends on several factors, including the size of the data, their quality and variety, as well as understanding what answers based on this data the business needs. For this reason, you have to try many different algorithms, checking the effectiveness of each on the test data set, and then choose the best option. Given this, you need to choose among the existing algorithms, those that meet this problem. The authors of the article paid attention to the accuracy, time for training, parameters, data. Therefore, choosing the right algorithm is a combination of business needs, specifications, experimental work and accounting for available time. The introduction of machine learning methods in various fields was studied. The process of machine learning is presented, which includes the following stages: data preparation, creation of training sets, creation of the classifier, training of the classifier, drawing up of forecasts, estimation of productivity of the classifier and adjustment of parameters. Analyze the use of different classification algorithms using the Python library, Scikit-learn, analyze the use of the method of model selection, calculation, formatting and data preparation, select the optimal input values and models. The estimation of several variants of a classifier estimation is resulted. The aim of the work is to study the library for the effectiveness of its practical application. The paper presents methods of classification in machine learning using the Scikit-Learn library. A comparison of different classification methods using Scikit-learn for machine learning models is performed.*

**Key words:** machine learning, classification, optimization, data analysis, forecasting.

**Левкін Д.А.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

**Макаров О.А.**

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

**Завгородній О.І.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

**Левкін А.В.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОТОЧКОВИХ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ

*У статті розглянуті питання математичного моделювання багатопарових технологічних систем, які містять джерела температурних полів. Дослідження авторів носять узагальнюючий характер та можуть бути застосовані для розрахунку керуючих параметрів довільних багатопарових систем. Це означає, що зі зміною об'єкта дослідження, в перспективі, не виникають складнощі з побудовою коректних розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей.*

*Автори розглядають багатопаровий матеріал під дією джерел термічного навантаження. Відзначимо, що в якості досліджуваного об'єкта часто виступають багатопарові матеріали зі складною геометрією, процес дії на які має свої специфічні особливості. Для таких матеріалів неможливо гарантувати коректності крайових задач, які лежать в основі розрахункових математичних моделей. Тому для розрахунку технологічних параметрів багатопарових систем доводиться відмовлятися від розгляду багатопарової структури матеріалу, а об'єкт дослідження замінюється на однопаровий матеріал (відрізок, куля), що сприяє подоланню складнощів обґрунтування коректності отриманих крайових задач. Це призводить до отримання усереднених значень функції мети і її параметрів, що негативно впливає на забезпечення технологічних процесів. Для уникнення цього, врахування під час моделювання та оптимізації багатопарової структури досліджуваних об'єктів авторами детально досліджені розрахункові та прикладні оптимізаційні математичні моделі.*

*Дослідження статті присвячені визначенню та перевірці виконання умов коректності багатоточкових крайових задач у багатопаровому середовищі. Проведені дослідження лежать в основі вибору та обґрунтування коректності розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей для, наприклад, лазерної сварки біоматеріалу, ділення ранніх елітних ембріонів.*

**Ключові слова:** математичне моделювання, коректність, крайові задачі, оптимізація, багатопарове середовище.

**Постановка проблеми.** Провівши ряд експериментальних досліджень з аналізу стану багатопарових систем, які містять джерела впливу фізичних полів, вченими була показана важливість етапу математичного моделювання та оптимізації. Задля економії витрат технічних та інших ресурсів систем, а також збільшення точності оптимізації параметрів необхідна постановка коректних крайових задач основних диференціальних рівнянь. Виконання цієї вимоги дозволить забезпечити автоматизацію проектування багатопарових систем.

Автори пропонують підхід для доведення коректності багатоточкових крайових задач в багатопаровому середовищі для випадку, коли дово-

диться мати справу з багатопаровим об'єктом складної форми з наявністю специфічних особливостей (зони заборони, нерівності на зовнішньому шарі та інші особливості). Таким чином, у статті не конкретизований об'єкт дослідження. Це дає можливість стверджувати, що в даній роботі закладені основи для подальшого дослідження розрахункових та прикладних оптимізаційних математичних моделей процесу дії джерел фізичних полів на багатопаровий матеріал. Тема дослідження широко застосовується для розв'язання, наприклад, задач синтезу технічних систем з джерелами фізичних полів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведемо аналіз наукових публікацій стосовно

до вирішення питань розрахунку та оптимізації багат шарових систем з локальною дією на них джерел відповідних фізичних полів [1–3]. У монографії [1] наведені наукові дослідження, які стосуються питань розрахунку та оптимізації механічних, технічних, електротехнічних, екологічних, гідродинамічних та інших систем, які піддаються дії зосереджених рухомих джерел фізичних полів. Питанням розрахунку та технічного забезпечення технологічних процесів лазерної дії на багат шарові матеріали присвячені результати роботи [2]. У роботі [3] наведені температури лазерного нагріву ембріону для декількох теплових режимів в залежності від тривалості та потужності лазерної дії. Детально досліджені нелокальні крайові задачі для диференціальних та псевдодиференціальних рівнянь, а також отримані умови коректності двоточної крайової задачі в довільних просторах функцій в роботах [4, 5].

**Постановка завдання.** Побудувати коректні багатоточкові крайові задачі, які описують стан багат шарових систем та містять джерела дії фізичних полів. Це дозволить гарантувати адекватність розрахункових та прикладних оптимізаційних математичних моделей, що дасть змогу автоматизувати дослідження багат шарових систем.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для дослідження умов коректності багатоточкової крайової задачі в багатошаровому середовищі розглянемо однорідну та неоднорідну крайові задачі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_1 \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t) \quad npu \quad t \in [0; t_1], \quad x \in R^m; \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_2 \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t) \quad npu \quad t \in [t_1; t_2], \quad x \in R^m; \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A_n \left( \frac{\partial}{i\partial x} \right) u(x,t) \quad npu \quad t \in [t_{n-1}; T], \quad x \in R^m. \end{array} \right. \quad (1)$$

$$B_0 \left( \frac{\partial}{i \partial x} \right) u(x, 0) + B_1 \left( \frac{\partial}{i \partial x} \right) u(x, t_1) + \cdots + B_n \left( \frac{\partial}{i \partial x} \right) u(x, T) = \varphi(x) \quad (2)$$

[illegible]

$$B_0 \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) u(x, 0) + B_1 \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) u(x, t_1) + \cdots + B_n \left( \frac{\partial}{\partial x} \right) u(x, T) = 0. \quad (4)$$

Тут  $A_k\left(\frac{\partial}{i\partial x}\right)$  і  $B_k\left(\frac{\partial}{i\partial x}\right)$  – псевдодиференціальні оператори з символами з простору нескінченно дифе-

ренційованих функцій степеневого зростання, а розв'язки  $u(x, t)$  припустимо, що неперервні за  $t$  в усьому шарі та диференційовані при  $t \neq t_k$ .

Розгляд будемо вести у просторах Соболева-Слободяцького  $H_l^s$ , а також у просторах Л. Шварца.

Подіємо перетворенням Фур'є (за просторовими змінними) на рівняння з неоднорідної крайової задачі (1) – (2). Отримаємо крайову задачу:

$$\left\{ \begin{array}{lll} \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A_1(s) \tilde{u}(s,t) & npu & t \in [0; t_1], \quad s \in R^m; \\ \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A_2(s) \tilde{u}(s,t) & npu & t \in [t_1; t_2], \quad s \in R^m; \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A_n(s) \tilde{u}(s,t) & npu & t \in [t_{N-1}; T], \quad s \in R^m. \end{array} \right. \quad (5)$$

$$B_0(s)\tilde{u}(s,0) + B_1(s)\tilde{u}(s,t_1) + \dots + B_n(s)\tilde{u}(s,T) = \varphi(s), \quad (6)$$

де  $\tilde{u}(s, t) = F_x u(x, t)$ ,  $\varphi(s) = F_x \varphi(x, t)$ ;

$A_k(s)$ ,  $B_k(s)$  – символи відповідних псевдодиференціальних операторів.

За аналогією, діючи перетворенням Фур'є на неоднорідну крайову задачу (3) – (4), отримали наступну крайову задачу:

[illegible]

$$B_0(s)\tilde{u}(s,0)+B_1(s)\tilde{u}(s,t_1)+\cdots+B_n(s)\tilde{u}(s,T)=0, \quad (8)$$

де  $f(s, t) = F_x f(x, t)$ .

Відзначимо, що перетворення Фур'є переводить простір  $H^s$  в простір  $H^s$ , простір  $S$  – в себе ж, а мультиплікатори у просторі  $S$  належать простору нескінченно диференційованих функцій степеневого зростання.

Будемо шукати розв'язок задачі (5) – (6) в такому вигляді:

$$\tilde{u}(s, t) = \begin{cases} \exp tA_1(s)\varphi_1(s) & npu & t \in [0; t_1]; \\ \exp tA_2(s)\varphi_2(s) & npu & t \in [t_1; t_2]; \\ \dots & \dots & \dots \\ \exp(t - t_{n-1})A_n(s)\varphi_n(s) & npu & t \in [t_{n-1}; T]. \end{cases} \quad (9)$$

З умови неперервності отримали розв'язок:

$$\varphi_k(s) = \exp \left( t_1 A_1(s) + (t_2 - t_1) A_2(s) + \dots \right. \\ \left. + (t_{k-1} - t_{k-2}) A_{k-1}(s) \right) \varphi_1(s) \quad . \quad (10)$$

Якщо підставити розв'язок (10) в умову (6), то отримаємо:

$$B_0(s)\varphi_1 + B_1(s)\exp t_1 A_1(s)\varphi_1 + \dots + \varphi_1 B_n(s)\exp \left( t_1 A_1(s) + (t_2 - t_1)A_2(s) + \dots + (T - t_{n-1})A_n(s) \right) = \varphi(s). \quad (11)$$

Якщо функція:

$$\Delta(s) = B_0(s) + B_1(s)\exp t_1 A_1(s) + \dots + B_n(s)\exp \left( t_1 A_1(s) + (t_2 - t_1)A_2(s) + \dots + (T - t_{n-1})A_n(s) \right) \neq 0, \quad (12)$$

тоді  $\varphi_1(s) = \varphi(s)/\Delta(s)$ , а розв'язок крайової задачі (5) – (6) має наступний вигляд:

$$\tilde{y}(s, t) = Q(s, t)\varphi(s), \quad (13)$$

де функція  $Q(s, t)$  для однорідної крайової задачі (1) – (2) подана в наступному вигляді:

$$Q(s, t) = \begin{cases} \exp t A_1(s) / \Delta(s) & \text{нпу} \quad t \in [0; t_1]; \\ \exp t A_2(s) / \Delta(s) & \text{нпу} \quad t \in [t_1; t_2]; \\ \dots & \dots \\ \exp ((t - t_{n-1})A_n(s) + \dots + t_1 A_1(s)) / \Delta(s) & \text{нпу} \quad t \in [t_{n-1}; T]. \end{cases} \quad (14)$$

Перейдемо до розгляду крайової задачі для неоднорідного рівняння (3) – (4). Задля цього знадобиться визначення функції Гріна для крайової задачі (7) – (8). З'ясуємо, як пов'язана функція Гріна з функцією  $Q(s; t)$ . Для функції  $Q(s; t)$  має місце результат, що отримали в роботі [6].

Якщо в задачі (5) – (6) існує функція  $Q(s; t)$ , тоді в задачі (7) – (8) існує функція Гріна, при чому для данної функції Гріна виконується наступна система:

$$G(t, \tau, s) = \begin{cases} - \sum_{k, t_k > \tau} B_k(s)Q(s, t - \tau + t_k) & \text{нпу} \quad t \leq \tau; \\ \sum_{k, t_k \leq \tau} B_k(s)Q(s, t - \tau + t_k) & \text{нпу} \quad t > \tau. \end{cases} \quad (15)$$

Далі з'ясуємо, як пов'язана коректність однорідної крайової задачі (1) – (2) з простору  $S$  у простір  $C([0; T], S)$  з коректністю неоднорідної крайової задачі (3) – (4) у просторі  $C([0; T], S)$ . Для цього скористаємося твердженням з роботи [6], що коректність однорідної крайової задачі (1) – (2) з простору  $S$  у простір  $C([0; T], S)$  зумовлює коректність неоднорідної крайової задачі (3) – (4) у просторі  $C([0; T], S)$ .

На підставі наведених розрахунків покажемо, що параболічну крайову задачу можна збурювати підлеглим псевдодиференціальним оператором. Для цього знадобиться твердження про те, що умова параболічності однорідної крайової задачі (1) – (2) необхідна для коректності з простору

$C([0; T], H^s)$  в простір  $C([0; T], H^{s-q})$  збуреного рівняння з однорідними крайовими умовами за достатньо малими збуреннями.

Таким чином, отримані вище результати, у перспективі дозволять отримати умови коректності для псевдодиференціальних рівнянь зі змінними за  $t$  символами. У роботах [7–9] представлено подальше дослідження розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей. Для визначеності розглянемо оптимізаційні задачі процесу термічної дії на багат шарові матеріали.

Основна оптимізаційна задача полягає в тому, що необхідно запропонувати принципи побудови розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей, а також чисельних методів та спеціалізованих програмно-апаратних засобів, які дозволять здійснити: оптимізацію параметрів теплової дії на багат шаровий матеріал з урахуванням обмежень на температурне поле та зменшення пошкодженості матеріалу; автоматизацію процесу моделювання термічного навантаження з метою підвищення якості технологічного процесу. Виходячи з постановки основної оптимізаційної задачі, функція мети має вигляд:

$$T = T(x, y, z, t, z^*), \quad (16)$$

де  $T(x, y, z, t, z^*)$  – температурне поле;  $(x, y, z)$  – область точок багат шарового матеріалу;  $t_0$  і  $t^*$  – початковий та кінцевий моменти часу  $t$ ;  $z^*$  – вектор параметрів дії.

Значення температурного поля (функції мети) повинні вдовольняти умові:

$$\frac{\min T}{\max T} \rightarrow \max_{z^* \in Z} \rightarrow 1. \quad (17)$$

При системі двосторонніх обмежень на мінімальне та максимальне значення температурного поля.

Математична модель основної оптимізаційної задачі повинна забезпечити деякий екстремум (в залежності від постановки крайових задач) на множині параметрів  $z^*$ , а саме: розмір області матеріалу, час та інтенсивність теплової дії, енергія дії, траєкторія руху джерела поверхнею матеріалу, густина дії, що описуються системою нелінійних обмежень:

$$\underset{\substack{(x, y, z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0; t^*] \\ z^* \in Z}}{\text{extr}} T(x, y, z, t, z^*). \quad (18)$$

Це означає, що необхідно відшукати такі параметри вектора  $z^*$ , які б забезпечили виконання екстремуму (18). Такими параметрами будуть:



$$z_0^* = \arg \max_{\substack{(x,y,z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0, t^*] \\ z^* \in Z}} T(x, y, z, t, z^*), \quad (19)$$

де  $z_0^*$  – вектор параметрів, забезпечуючий екстремум функції мети.

На параметри вектора теплової дії  $z^*$  накладені двосторонні обмеження їх зміни.

Розглянувши формалізацію математичних моделей для одинадцяти прикладних оптимізаційних задач, Левкін Д.А. здійснив чисельну реалізацію для декількох з них.

Математична модель 1. Необхідно мінімізувати різницю між значеннями температурного поля  $T$  в заданих точках  $(x, y, z)$  багатошарової системи та наперед заданими допустимими значеннями температурного поля  $T^*$ , тобто знайти:

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_i \\ i=1, N \\ t \in [t_0, t^*]}} |T(x, y, z, t, z^*) - T^*|, \quad (20)$$

де  $T(x, y, z, t, z^*)$  – температурне поле;  $(x, y, z)$  – область багатошарового матеріалу;  $T^*$  – допустиме значення температурного поля.

Математична модель 2. Потрібно знайти процент життєздатності (травмованості)  $P$  матеріалу:

$$P = \frac{V_{\text{segm}}}{V} \times 100\%, \quad (21)$$

де  $V_{\text{segm}}$  – об'єм сегменту матеріалу, що піддається впливу;  $V$  – об'єм матеріалу.

Для оцінки локального нагріву сегмента повинна виконуватись наступна система:

$$V_{\text{segm}} = \begin{cases} V_1, & T_i > T^*; \\ V_2, & T_i \leq T^*, \end{cases} \quad (22)$$

де  $V_1$  – об'єм травмованого сегменту;  $V_2$  – об'єм життєздатного сегменту матеріалу.

Таким чином, потрібно задати такі параметри теплової дії, щоб скоротити об'єми травмованого сегмента матеріалу чи збільшити об'єми життєздатного сегменту.

Математична модель 3. Розглянемо задачу мінімізації ухилення температурного поля матеріалу від наперед заданого розподілу  $T_0(x, y, z, t)$  температурного поля на гладкій кривій  $L$  матеріалу. У цьому випадку у зв'язку з тим, що мінімізацію різниці між отриманим температурним полем  $T(x, y, z, t, z^*)$  і наперед заданим значенням  $T_0(x, y, z, t)$  необхідно здійснити за вектором  $z^*$  параметрів теплової дії на матеріал, в основі відповідної математичної моделі лежатиме середньоквадратичне ухилення цих двох функцій:

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x,y,z) \in L \\ t \in [t_0, t^*]}} \left( \int_L (T(x, y, z, t, z^*) - T_0(x, y, z, t))^2 dL \right)^{1/2}. \quad (23)$$

У свою чергу,  $T(x, y, z, t, z^*)$  – температурне поле точок  $(x_i, y_i, z_i) \in L$ ,  $i = 1, \dots, N$  гладкої кривої багатошарового матеріалу.

Перспективним напрямком досліджень є вивчення міжшарового розподілу температурних полів у нелінійних матеріалах. Прикладна оптимізаційна математична модель полягає в тому, що необхідно забезпечити виконання:

$$\min_{z^* \in Z} \left( \max_{\substack{(x,y,z) \in N_1 \\ t \in [t_0, t^*]}} T(x, y, z, t, z^*) - \min_{\substack{(x,y,z) \in N_2 \\ t \in [t_0, t^*]}} T(x, y, z, t, z^*) \right). \quad (24)$$

При цьому  $T(x, y, z, t, z^*)$  є температурним полем сусідніх шарів матеріалу.

Слід відзначити, що для оптимального використання технічних ресурсів багатошарових систем та скорочення витрат піддослідного матеріалу потрібна миттєва реалізація одразу декількох прикладних оптимізаційних математичних моделей з оптимізацією більшого числа параметрів процесу термічної дії. При цьому для забезпечення ітераційного процесу пошуку та спрямованого перебору локальних екстремумів температурного поля потрібна багаторазова реалізація декількох крайових задач. У зв'язку зі специфічними особливостями прикладних оптимізаційних математичних моделей (нелінійність функції мети та системи обмежень на параметри теплової дії, багатоекстремальність прикладних задач оптимізації, багатозв'язність області розв'язків) для їх програмно-апаратної реалізації доцільно застосовувати сіткові процесори на аналогових і гібридних моделях. Це дозволить підвищити точність та швидкість оптимізації параметрів багатошарових систем.

**Висновки.** У статті визначені та детально досліджені умови коректності багатоточкових крайових задач в багатошаровому середовищі. Авторами з'ясовано, якими диференціальними операторами можна збурювати праву частину (джерело дії) основного диференціального рівняння крайової задачі, щоб вона залишилась коректною. Наявність та виконання вказаних у даній роботі умов коректності багатоточкових крайових задач дозволить стверджувати про їх коректність для довільних багатошарових систем, які містять джерела впливу фізичних полів у випадку, коли в якості досліджуваного об'єкта розглядають багатошаровий матеріал зі складною геометрією. Це дозволить збільшити точність та швидкість реалізації розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей, а також дасть змогу вдосконалити відомі та запропонувати нові методи для автоматизації проектування складних систем.

Список літератури:

1. Стоян Ю.Г., Путятин В.П. Оптимизация технических систем с источниками физических полей. Київ : Наук. думка, 1988. С. 44–48.
2. Чубаров Е.П. Управление системами с подвижными источниками воздействия. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 288 с.
3. Douglas-Hamilton D.H., Conia J. Thermal effects in laser-assisted pre-embryo zona drilling. *Journal of Biomedical Optics*. 2001. Vol. 6, Issue 2. P. 205. DOI: 10.1117/1.1353796.
4. Пташник Б.Й., Ільків В.С., Кмит І.Я., Поліщук В.М. Нелокальні крайові задачі для рівнянь із частинними похідними. Київ : Наукова думка, 2002. 416 с.
5. Макаров А.А. Существование корректной двухточечной краевой задачи в слое для систем псевдодифференциальных уравнений. *Дифференциальные уравнения*. 1994. Т. 30. № 1. С. 144–150.
6. Макаров А.А., Левкин Д.А. Многоточечная краевая задача для псевдодифференциальных уравнений в полислое. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Математика, прикладна математика і механіка*. Харків, 2014. Вип. 69. № 1120. С. 64–74.
7. Мегель Ю.Е., Левкин Д.А. Математическая модель теплового нагрева многослойного микробиологического объекта. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков, 2012. № 3/4 (57). С. 4–8.
8. Levkin A., Levkina R., Petrenko A., Chaliy I. Economic Security as a Result of Modern Biotechnology Implementation: 2019 IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T '2019) (8-11 October 2019 Kyiv). Kyiv, 2019. P. 139–142.
9. Мегель Ю.Е., Путятин В.П., Левкин Д.А., Левкин А.В. Математическое моделирование и оптимизация параметров действия лазерного луча на многослойные биоматериалы. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. № 20(1242). С. 60–64.

**Levkin D.A., Makarov O.A., Zavgorodniy A.I., Levkin A.V. THE THEORETICAL RESEARCH OF MULTI-POINT BOUNDARY TASKS**

*The article considers the issues of mathematical modeling of multilayer technological systems that contain sources of temperature fields. The authors' research is of generalizing nature and can be used for calculating the test parameters of arbitrary multilayer systems. This means that with the change of the object of the research, in the long run, there are no difficulties in building correct calculations and applied optimization mathematical models.*

*The authors consider a multilayer material under the action of heat sources. It is stated that the studied object is often multilayer materials with complex geometry, the process of action on which has its own specific features. For such materials it is not possible to guarantee the correctness of the boundary value problems that underlie the calculated mathematical models. Therefore, in order to calculate the technological parameters of multilayer systems, it is necessary to abandon the multilayer structure of the material, and the object of study is replaced by a single-layer material (segment, sphere) which helps to overcome the difficulties of substantiating the correctness of the obtained boundary value problems. At the same time, this leads to obtaining average values of the goal function and its parameters, which negatively affects the provision of technological processes. To avoid this, taking into account when modeling and optimizing the multilayer structure of the studied objects, the authors have studied in detail the calculation and applied optimization mathematical models.*

*The research of the article is devoted to the definition and verification of the conditions correctness of multipoint boundary value problems in a multilayer environment. The conducted researches are the basis of the choice and substantiation of the calculation correctness and applied optimization mathematical models for, for example, laser welding of biomaterial, division of early elite embryos.*

**Key words:** mathematical modeling, correctness, boundary value problems, optimization, multilayer environment.

**Романюк Л.А.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

**Чихіра І.В.**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

У статті досліджується структура системи управління повітряним рухом безпілотного літального апарату, описано основні складники системи, що входять до загальної сукупності апаратного забезпечення комплексу автоматизованого управління рухом. Розкрито вдосконалену методику побудови системи управління та описано функціональні та структурні особливості складників системи автоматизованого управління системою навігації. Визначено блочну структуру системи управління повітряним рухом безпілотного літального апарату. Запропоновано алгоритм реалізації автоматизованої системи управління із моделюванням на реальних об'єктах результату дієвості. Охарактеризовано вплив керуючих механізмів на загальну побудову траєкторії руху з наведенням сигналів управління. Визначено частку впливу помилок усталеного польоту під час відпрацювання вхідного корисного сигналу (команд управління) за наявності перешкод, ліній радіоуправління та сигналів команд управління рухом безпілотного літального апарату. Запропоновано математичний складник флуктуаційної помилки, яка визначається спектром перешкоди, що знаходиться всередині смуги пропускання. Встановлено, що збільшення смуги пропускання призводить до зменшення динамічної помилки і збільшення флуктуаційної помилки, натомість зменшення смуги пропускання призводить до збільшення динамічної і зменшення флуктуаційної помилки. Розроблено структурну схему системи управління польотом безпілотного літального апарату, яка містить потенціометри – датчик і прийомник, пристрій порівняння вхідного і вихідного сигналів, підсилювач, електричний двигун з редуктором і тахогенератор для вимірювання швидкості обертання вала двигуна безпілотного літального апарату. Досліджено перехідний процес без коригуючих ланок та з урахуванням останніх. Доведено, що застосування додаткових нелінійних коригуючих елементів під час надходження на підсилювач сигналу різниці між положеннями двигунків потенціометрів і зі знаком «мінус» сигналу з виходу тахогенератора дає позитивний вплив на стабілізацію руху безпілотного літального апарату.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, управління повітряним рухом, простір, автоматизована система, політ.

**Постановка проблеми.** Проблеми автоматизованого управління повітряним рухом безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є актуальними в умовах сьогодення, з урахуванням ситуації, що склалася на Сході України. Використання БПЛА в умовах розвідки є пріоритетним напрямом формування стратегічних дій українських військових формувань. Побудова автоматизованої системи управління повітряним рухом БПЛА здійснюється як система збільшення стійкості для наземного пілота, що передбачає підвищення безпеки польотів та покращення характеристик траєкторії формування шляху БПЛА.

Використання автоматизованого управління, реалізує субоптимальний контроль за траєкторією польоту як одного БПЛА, так і групи слідкуючих об'єктів.

Методика побудови автоматизованого управління повітряним рухом БПЛА базується на

модельно-орієнтованому проектуванні. Для забезпечення польоту БПЛА в умовах перешкод є можливість здійснювати формування характеристик стабільності та керованості на всіх рівнях маневрування.

Головними джерелами вихідної інформації є математична модель динаміки БПЛА, виконуючі пристрої, сенсори, датчики, функції систем орієнтації та кінцева точка шляху. На основі згаданих параметрів та обмежуючих факторів автоматизована система управління повітряним рухом БПЛА повинна сформувати траєкторію шляху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Масштабність сучасних наукових досягнень за темою дослідження є суттєвою. Питання формування системи автоматизованого управління повітряним рухом БПЛА у своїх роботах розглядали як зарубіжні, так і вітчизняні вчені.

В.І. Гриценко, О.Є. Волков, М.М. Комар, Ю.П. Богачук [1] дослідили головні аспекти оптимізації системи управління легкого безпілотною літального апарату за частотним критерієм, математично обґрунтувавши вибір напрямку руху та обхід перешкод. В.П. Бабенко [2] обґрунтував схемами та розрахунком інформаційно-вимірну та управляючу систему малорозмірного безпілотною літального апарату підвищеної точності. Стосовно автоматичного управління системою навігації БПЛА варто відмітити роботи І.О. Кашасєва, О.А. Усачова, С.М. Новічонка, В.М. Петрова [3], О.В. Ярового [4], О.А. Мясіщева, В.В. Швеця [5] та інших. Автори детально описують можливість застосування автоматичного управління системою навігації БПЛА в умовах перешкод та механізми формування траєкторії польоту. Низка сучасних авторів М.Н. Ясечко, А.І. Дохов, М.Г. Іванець, О.В. Тесленко [6] з фізико-математичного погляду описують вплив радіоелектронної апаратури під час управління БПЛА з відокремленням параметрів сигналів випромінювачів. Щодо використання БПЛА та управління в умовах перешкод під час проведення воєнних дій, то варто відмітити праці таких науковців, як М.Н. Ясечко, А.В. Очкурєнко, А.А. Ковальчук, Д.В. Максютя [7], які наводять короткий огляд сучасних засобів придушення радіоелектронної апаратури та переходу управління безпілотною літальним апаратом сил антитерористичної операції. Автори детально описують можливість застосування засобу функціонального ураження радіоелектронних систем БПЛА. Із зарубіжних вчених варто відмітити роботи Williams P., та Crump M [8] та Tang D., Li F., Shen N., і Guo S. [9]. Однак, попри результати наукових розробок відповідно до теми дослідження, питання розробки системи автоматизованого управління повітряним рухом БПЛА залишається відкритим та потребує детального вивчення.

**Постановка завдання.** У статті необхідно розробити автоматизовану систему управління повітряним рухом безпілотною літальним апаратом.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Якість управління польотом БПЛА визначається помилками усталеного польоту за відпрацювання вхідного корисного сигналу (команд управління) за наявності перешкод.

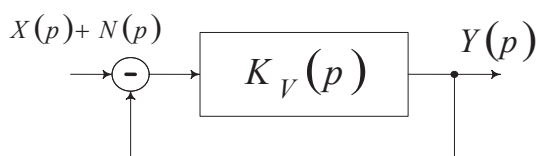


Рис. 1. Загальна схема управління польотом БПЛА

де  $X(p)$  – вхідний сигнал команд управління;  $N(p)$  – перешкоди лінії радіоуправління.

Для якісного представлення помилок управління будемо вважати, що канал тангажу БПЛА є ФНЧ (фільтр нижніх частот) зі смугою (рис. 1).

$$K_0(\omega) = \begin{cases} 1, & 0 < \omega \leq \omega_0 \\ 0, & \omega > \omega_0 \end{cases}, \quad (1)$$

де  $K_0(p) = \frac{K_v(p)}{1 + K_v(p)}$  – передавальна характеристика замкнутого каналу тангажу;

$\omega_0 = \frac{1,5}{T}$  – смуга пропускання замкнутого каналу тангажу.

Нехай вхідний сигнал  $x(p)$  має енергетичний спектр  $S_X(\omega)$ , потужність якого зменшується зі збільшенням частоти. Як перешкоду будемо розглядати «білий» шум з постійною спектральною щільністю  $S_N(\omega) = \frac{N_0}{2}$ .

Тоді динамічна помилка відпрацювання корисного вхідного сигналу буде визначатися (рис. 2):

$$\bar{Z}_{дин}^2 = \frac{1}{\pi} \int_{N_0}^{\infty} S_X(\omega) \cdot |1 - K_0(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{\pi} \int_{\omega_0}^{\infty} S_X(\omega) d\omega, \quad (2)$$

тобто буде частиною спектра корисного сигналу, який знаходиться за межами смуги пропускання  $\omega_0$  і не відпрацьовується системою.

Флуктуаційна помилка визначається спектром перешкоди, який знаходиться всередині смуги пропускання [6]:

$$\bar{Z}_{фл}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} S_N(\omega) K_0^2(\omega) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_0} S_N(\omega) d\omega \quad (3)$$

З рис. 1 легко побачити наступне:

1) Збільшення смуги пропускання  $\omega_0$  призводить до зменшення  $\bar{Z}_{дин}^2$  динамічної помилки та збільшення  $\bar{Z}_{фл}^2$  флуктуаційної помилки.

2) Зменшення смуги пропускання  $\omega_0$  призводить до збільшення динамічної помилки та зменшення флуктуаційної.

Є оптимальна смуга  $\omega_{0opt}$ , коли сумарна помилка буде мінімальною:

$$\bar{Z}_{\Sigma \min}^2 \Big|_{\omega_0 = \omega_{0opt}} = \bar{Z}_{дин}^2 + \bar{Z}_{флук}^2 \quad (4)$$

Для цього в каналі тангажу повинна бути система, що забезпечує її оптимальну смугу.

Для комп'ютерного дослідження смуги пропускання БПЛА (знаходження динамічної помилки) на вхід каналу управління потрібно подати сигнал "Ramp" і за допомогою ключів забезпечити включення всіх ланцюгів. За різницею між вхідною



функцією та вихідною визначається динамічна помилка (рис. 3).

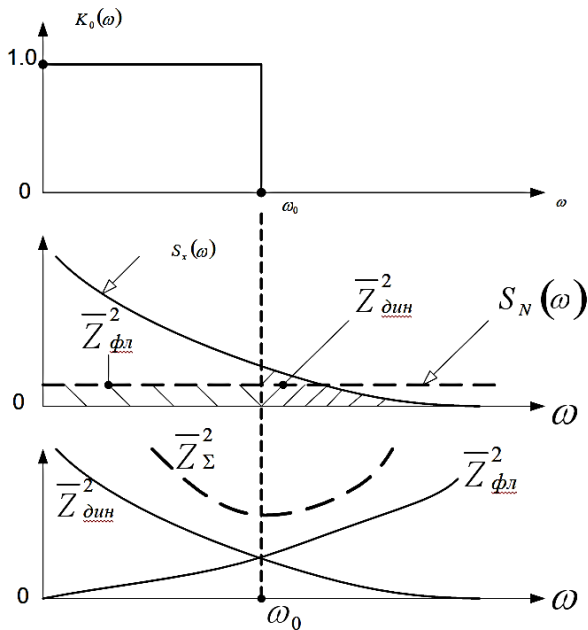


Рис. 2. Сму́га пропускання БПЛА

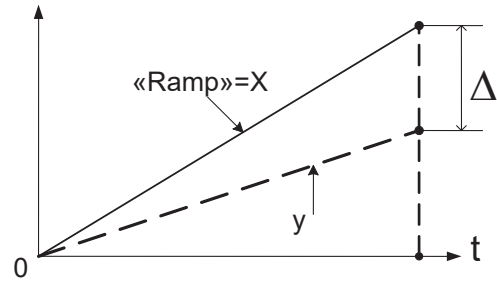


Рис. 3 Динамічна помилка [7]

У теорії автоматичного регулювання відомо, що застосування додаткових нелінійних елементів дозволяє покращувати перехідні процеси, зокрема в слідкуючих системах. Таким чином, для підвищення якості управління повітряним рухом безпілотним літальним апаратом основний акцент зробимо на стабілізації руху за рахунок аналізу інформації з датчиків обробки інформації. Блок-схема елементів безпілотного літального апарату наведена на рис. 4.

Основна ідея полягає в удосконаленні процесу стабілізації заданого руху таким чином, щоб у разі великого відхилення від нього спостерігалася

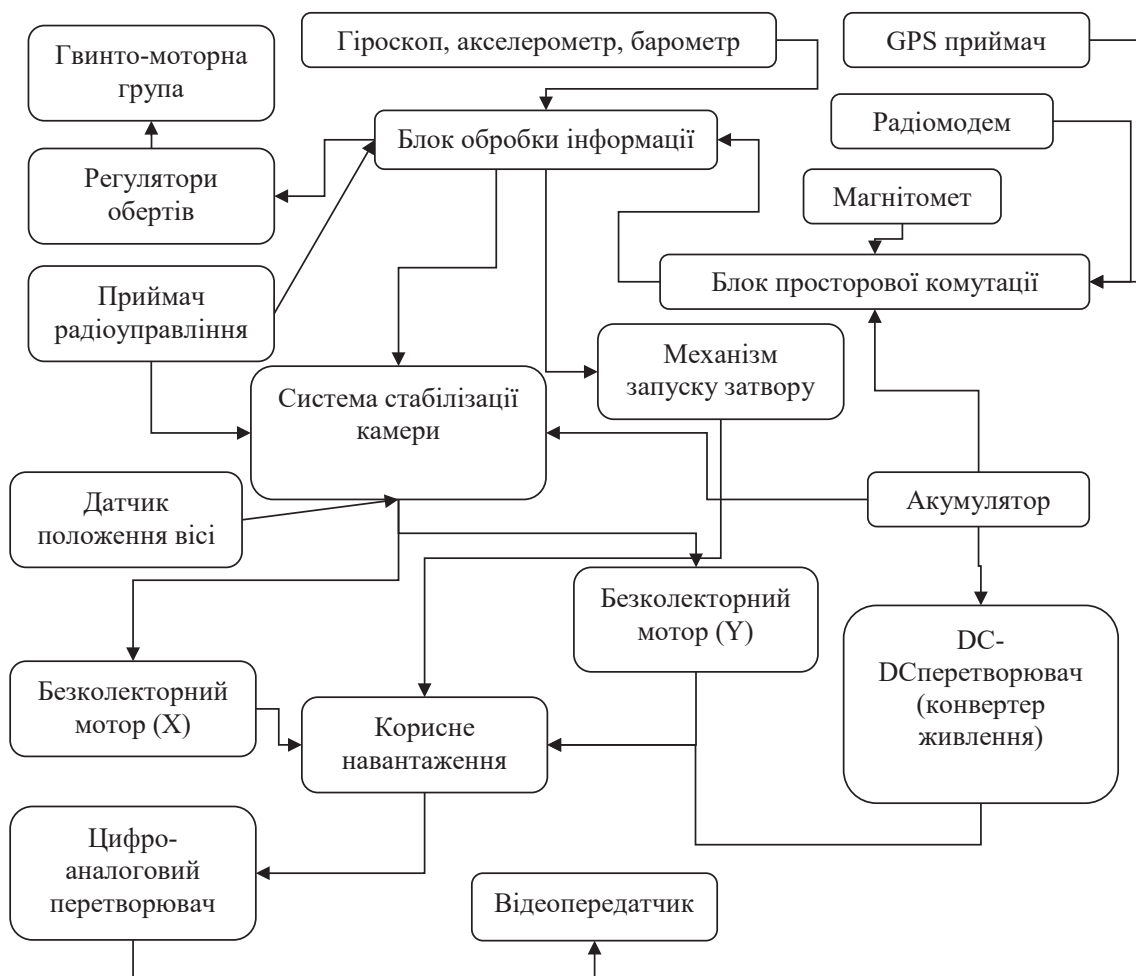


Рис. 4. Блок-схема елементів безпілотного літального апарату

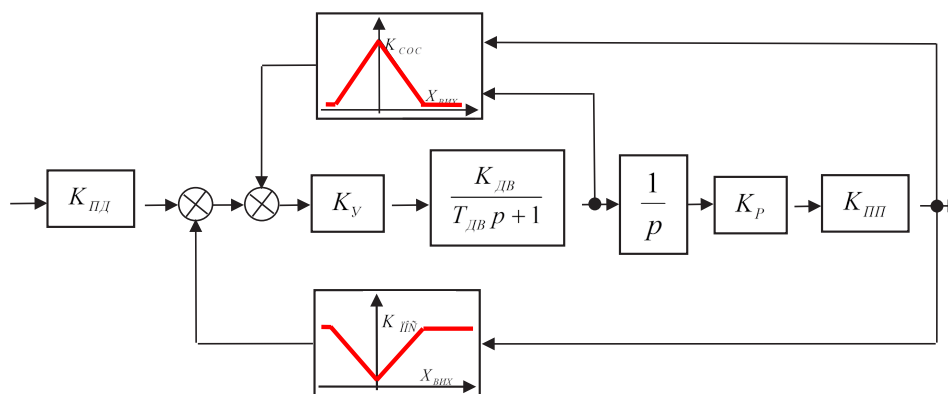


Рис. 5. Структурна схема системи управління польотом БПЛА

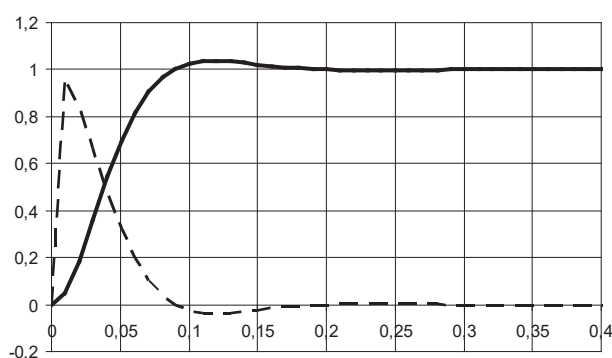


Рис. 6. Перехідний процес без коригуючих ланок

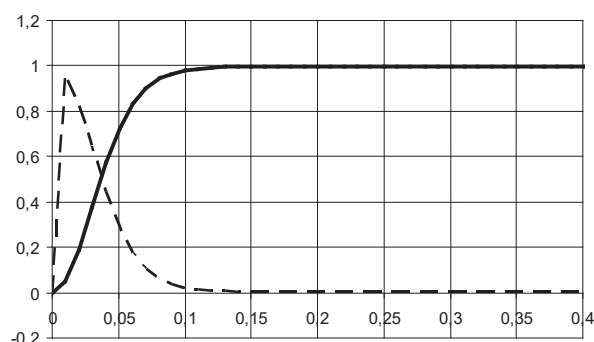


Рис. 7. Перехідний процес з коригуючими ланками

тенденція досягати зближення, і на це спрямовувати ресурс регулятора, а по мірі зменшення відхилення ресурс регулятора спрямовувався на відвернення перерегулювання.

Таким чином, маємо ПД регулятор, у якому функції зменшення відхилення і демпфування процесу зменшення є пов'язаними і керуються на більш високому рівні, тобто регулятор зі змінними, керованими на вищому рівні параметрами.

Типова схема системи управління повітряним рухом БПЛА містить потенціометри – датчик і прийомник, пристрій порівняння вхідного і вихідного сигналів, підсилювач, електричний двигун з редуктором, тахогенератор для вимірювання швидкості обертання вала двигуна. Перехідний процес без коригуючих ланок наведено на рис. 6.

На підсилювач подається сигнал різниці між положеннями движків потенціометрів та зі знаком

«мінус» сигнал з виходу тахогенератора. Ці сигнали перетворюємо, пропускаючи їх через додаткові нелінійні коригуючі елементи, та отримаємо результат рис. 7.

**Висновки.** У статті розкрито методику побудови автоматизованої системи управління повітряним рухом безпілотним літальним апаратом. Наведена схема є вдосконаленою методикою побудови системи управління повітряним рухом безпілотним літальним апаратом в умовах перешкод. Система управління, що описана, може бути використана як інтелектуальна система стійкості БПЛА в умовах формування траєкторії польоту.

Алгоритм побудови системи управління повітряним рухом безпілотного літального апарата є стійким до впливу зовнішніх та внутрішніх впливів.

#### Список літератури:

1. Гриценко В.І., Волков О.Є., Комар М.М., Богачук Ю.П. Інтелектуалізація сучасних систем автоматичного керування безпілотними літальними апаратами. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2018. № 1 (191). С. 45–59.
2. Бабенко В.П. Формування траси польоту БПЛА під час планування розвідувальних операцій. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей XXVII міжнарод-

ної науково-практичної конференції Micro CAD-2019, (15–17 травня 2019 р.) : у 5 ч. Ч. V. / за ред. проф. Сокола Є.І. Харків : НТУ «ХПІ». С. 15–16.

3. Кашаєв І.О., Усачова О.А., Новіченок С.М., Петров В.М. Застосування безпілотних літальних апаратів для вирішення задач моніторингу об'єктів аеродромної інфраструктури. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2019. № 2. С. 48–58.

4. Яровий О.В. Вибір оптимальних моделей безпілотних літальних апаратів та систем управління для виконання задач щодо моніторингу наземних об'єктів. *Молодий вчений*. 2018. № 5(1). С. 190–196.

5. Мясіщев О.А., Швець В.В. Режими польоту контролерів польоту арм 2.6 і pixhawk БПЛА. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2018. № 1 (257). С. 78–82.

6. Методы формирования и фокусировки электромагнитного излучения для воздействия на радиоэлектронные средства / М.Н. Ясечко, А.И. Дохов, М.Г. Иванец, О.В. Тесленко. Харьков : ХУПС, 2015. 220 с.

7. Современные радиотехнические средства борьбы с беспилотными летательными аппаратами в зоне проведения АТО / М.Н. Ясечко, А.В. Очкуренко, А.А. Ковальчук, Д.В. Максютя. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2015. № 3(44). С. 54–57.

8. Williams P., Crump M. All-source navigation for enhancing UAV operations in GPS-denied environments. *Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences*. Brisbane, 2012. URL: [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/130.PDF](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/130.PDF) (Last accessed: 17.03.2020).

9. UAV attitude and position estimation for vision-based landing / D. Tang et al. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. IEEE, 2011. Vol. 9. P. 4446–4450.

#### **Romaniuk L.A., Chykhira I.V. AUTOMATED AIR TRAFFIC CONTROL SYSTEM OF UNMANNED AERIAL VEHICLES**

*The article examines the structure of the air traffic control system of an unmanned aerial vehicle, describes the main components of the system that are included in the total hardware of the automated traffic control complex. An improved methodology for constructing a control system is disclosed and the functional and structural features of the components of the automated control system of the navigation system are described. The block structure of the air traffic control system of an unmanned aerial vehicle is determined. An algorithm for the implementation of an automated control system with modeling on real objects the result of effectiveness is proposed. The influence of control mechanisms on the general construction of the trajectory of movement with the indication of control signals is characterized. The share of the influence of stable flight errors during the development of the input useful signal (control commands) in the presence of obstacles, radio control lines and signals of the motion control commands of an unmanned aerial vehicle is determined. The mathematical component of the fluctuation error is proposed, which is determined by the spectrum of the obstacle inside the passband. It is established that an increase in the passband leads to a decrease in the dynamic error and an increase in the fluctuation error; while a decrease in the passband leads to an increase in the dynamic and a decrease in the fluctuation error. A structural diagram of the flight control system of an unmanned aerial vehicle is developed, containing potentiometers – a sensor and a receiver; a device for comparing input and output signals, an amplifier, an electric motor with a gearbox, and a tachogenerator for measuring the rotational speed of the motor shaft of an unmanned aerial vehicle. The transition process is studied without corrective links and taking into account the latter. It is proved that the use of additional nonlinear correction elements when the signal between the positions of the potentiometer engines and the minus sign of the signal from the output of the tachogenerator arrives at the amplifier gives a positive effect on the stabilization of the movement of the unmanned aerial vehicle.*

**Key words:** unmanned aerial vehicle, air traffic control, space, automated system, flight.

**Шілінг А.Ю.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОГО НАПОВНЕННЯ ДИСЦИПЛІН ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ВІДПОВІДНО ДО СТАНДАРТУ ISO/IEC-25010

*У статті досліджено проблеми вибору методів оцінювання якості інформаційного наповнення дисциплін для проведення дистанційного навчання закладами вищої освіти. Проведено аналіз чинних стандартів щодо визначення якості інформаційного наповнення дисциплін для дистанційного навчання з боку організації навчального процесу закладами вищої освіти. Зокрема, проаналізовано нормативно-правові документи, які встановлюють вимоги до якості надання вищої освіти, й державні стандарти оцінювання якості програмного забезпечення (далі – ПЗ). У статті визначено роль інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання як інформаційного продукту. Виявлено, що якісне проведення дистанційного навчання як основної форми освітнього процесу є необхідною умовою для надання освітніх послуг закладами вищої освіти в особливих внутрішньополітичних умовах держави. Визначення методів оцінювання якості інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання є важливим чинником для ефективної діяльності й конкурентоспроможності закладу вищої освіти на ринку освітніх послуг, а також надання якісних освітніх послуг закладами вищої освіти з урахуванням особливостей проведення дистанційного навчання. Інформаційне наповнення дисциплін для дистанційного навчання розглядається як інформаційний продукт. У статті до оцінювання якості інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання застосовано підходи, які є відомими для оцінювання якості таких інформаційних продуктів, як програмне забезпечення. Саме тому їхня якість визначається за набором показників стандарту ISO/IEC-25010. Виявлено, що для оцінювання якості інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання є придатними характеристики/підхарактеристики якості програмного забезпечення за стандартом ISO/IEC-25010, що дають змогу практично оцінити результати відповідності й ефективності освітнього процесу для закладів вищої освіти в умовах дистанційного навчання. Результати дослідження застосовуються й можуть бути використані для ефективного планування освітніх послуг і створення якісного контенту дисциплін дистанційного навчання.*

**Ключові слова:** дистанційне навчання, інформаційне наповнення дисциплін, заклад вищої освіти, показник якості, стандарт ISO/IEC-25010.

**Постановка проблеми.** Освітній процес – система науково-методичних і педагогічних заходів, спрямованих на розвиток особистості шляхом формування й застосування її компетентностей [1]. У загальному випадку впровадження освітніх заходів передбачає безпосереднє очне спілкування викладачів і споживачів освітніх послуг (студентів, учнів, слухачів тощо). Проведення дистанційного навчання також було складовою освітнього процесу й було одним із варіантів навчально-методичної співпраці представників закладу вищої освіти (далі – ЗВО) та студентів. Тобто дистанційне навчання найчастіше сприймалося як додатковий елемент надання освітніх послуг ЗВО. Але сучасний стан справ у вищій освіті, зокрема введення карантинного режиму в Україні у зв'язку з пандемією Covid-19, змінив ставлення до дистанційного навчання, надавши

йому статус основної форми надання освітніх послуг освітніми закладами, зокрема ЗВО. Тож якість наданих освітніх послуг під час дистанційного навчання як результат проведення освітнього процесу стала основним показником діяльності ЗВО.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** До основних нормативно-правових забезпечень стандартизації якості надання освітніх послуг закладами вищої освіти в процесі дистанційного навчання належать:

– *Закон України «Про вищу освіту»* [2], згідно з яким якість наданих освітніх послуг у сфері вищої освіти є рівнем здобутих споживачами освітніх послуг знань, умінь, навичок, що є відображенням її компетентності відповідно до стандартів вищої освіти. Цей закон визначає стандарт вищої освіти як сукупність вимог до змісту та



результатів освітньої діяльності вищих навчальних закладів і наукових установ за кожним рівнем вищої освіти в межах кожної спеціальності;

– **Закон України «Про Національну програму інформатизації»** визначає стратегію розв'язання проблеми забезпечення інформаційних потреб й інформаційної підтримки соціально-економічної, екологічної, науково-технічної, оборонної, національно-культурної та іншої діяльності у сферах загальнодержавного значення [3].

– **Наказ Міністерства освіти і науки України «Про затвердження Положення про дистанційне навчання» та Наказ Міністерства освіти і науки України «Про затвердження Змін до Положення про дистанційне навчання»** визначає дистанційне навчання як індивідуалізований процес набуття знань, умінь, навичок і способів пізнавальної діяльності людини, який відбувається в основному за опосередкованої взаємодії віддалених один від одного учасників навчального процесу у спеціалізованому середовищі, яке функціонує на базі сучасних психолого-педагогічних й інформаційно-комунікаційних технологій. Цей документ також містить шляхи реалізації дистанційного навчання, особливості організації навчального процесу, вимоги до науково-методичного й системотехнічного забезпечення дистанційного навчання [4–5];

– **Наказ Міністерства освіти і науки України від 30 жовтня 2013 р. № 1518 «Про затвердження Вимог до вищих навчальних закладів та закладів післядипломної освіти, наукових, освітньо-наукових установ, що надають освітні послуги за дистанційною формою навчання з підготовки та підвищення кваліфікації фахівців за акредитованими напрямками і спеціальностями»** визначає мінімальні вимоги до організаційного, кадрового, науково-методичного, матеріально-технічного, програмного й інформаційного забезпечення вищих навчальних закладів, закладів післядипломної освіти, наукових, освітньо-наукових установ, які є необхідними для надання освітніх послуг за дистанційною формою навчання [6];

– **Державні стандарти стосовно системи управління якістю:**

а) **ДСТУ ISO 9000:2007** [7]. Цей державний стандарт описує основні положення систем управління якістю й визначає термінологію для систем управління якістю. Застосування систем управління якістю є основним чинником для проведення аналізу вимоги замовників і забезпечення постійного контролю усіх процесів організації

для збільшення ймовірності підвищення задоволеності замовника та інших зацікавлених сторін;

б) **ДСТУ ISO 9001:2009** сприяє прийняттю процесного підходу в розробленні, впровадженні та покращенні результативності системи управління якістю для підвищення задоволеності споживачів освітніх послуг [8].

Дослідження [9–11] розглядають підходи до визначення якості вищої освіти та конкурентоспроможності ЗВО на ринку освітніх послуг. Аналіз стандартів і рекомендацій щодо забезпечення якості у Європейському просторі вищої освіти міститься в дослідженні [12]. Підходи до ефективного планування надання освітніх послуг закладами вищої освіти визначені в роботах [13–15].

Моделі дистанційного навчання й технології його впровадження описано в роботі [16]. Міжнародний досвід у сфері впровадження дистанційного навчання є предметом дослідження в працях [17–18].

Ці стандарти загалом установлюють вимоги до якості надання вищої освіти, але не розглядають умови оцінювання якості інформаційного наповнення надання освітніх послуг як передумови формування максимально якісного контенту дистанційних дисциплін для надання якісних освітніх послуг їхнім споживачам і налагодження ефективного освітнього процесу закладами вищої освіти.

**Постановка завдання.** Метою статті є вибір критеріїв оцінювання якості інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання для проведення якісного освітнього процесу й ефективного функціонування закладу вищої освіти на ринку освітніх послуг.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

**1. Аналіз методів оцінювання якості, придатних для планування надання освітніх послуг з використанням вебспільнот.** Дистанційне навчання – сукупність технологій, що забезпечують доставку студентам основного обсягу навчального матеріалу, інтерактивна взаємодія студентів і викладачів у процесі навчання, надання студентам можливості самостійної роботи з навчальними матеріалами, а також у процесі навчання [16].

Основним матеріалом, з яким працюють і викладачі, і споживачі освітніх послуг, є навчально-методичний контент дисциплін дистанційного навчання. Саме якісне інформаційне наповнення дистанційних курсів є запорукою ефективно організації навчального процесу закладами вищої освіти та якісного формування

знань, умінь і навичок споживачами освітніх послуг.

Формування якісного інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання вимагає здійснення постійного моніторингу його якості, визначення сучасних вимог до якості, проведення аналізу ринку освітніх послуг й інтересів споживачів цих послуг. Саме тому на сьогодні проблема формування якісного контенту дисциплін дистанційного навчання для проведення якісного освітнього процесу й ефективного функціонування закладу вищої освіти на ринку освітніх послуг є нагальною для представників закладів вищої освіти.

Оскільки якісний контент дисциплін дистанційного навчання повинен бути точним, повним і відповідати навчальній програмі дисципліни, всім правилам граматики, орфографії та лексичним нормам, а також інформація повинна бути подана з урахуванням вікових і психологічних особливостей споживачів освітніх послуг, тому до якості інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання належать якість змісту контенту, зокрема навчально-методичного, дисципліни та якість подання інформації.

У цій статті розглядаються лише питання якості змісту контенту дисциплін дистанційного навчання.

Якість змісту інформаційного наповнення дисципліни можна розглядати як сукупність властивостей, що відображають міру придатності конкретної інформації про об'єкти і їхні взаємозв'язки для досягнення цілей, що стоять перед користувачем, під час реалізації тих чи інших видів діяльності [19].

Формування інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання є інформаційним продуктом. Тому до оцінювання якості цього інформаційного наповнення застосовано підходи, які вже відомі для оцінювання якості таких інформаційних продуктів, як програмне забезпечення. Зокрема в [20; 21] застосовано методи оцінювання якості програмного забезпечення для інформаційного продукту у вигляді вебфорумів і спеціалізованих освітніх вебспільнот, у [22] – до інформаційного продукту у вигляді вебгалерей, а в [23] – до інформаційного продукту у вигляді баз даних. В Україні чинними є такі державні стандарти, пов'язані з оцінюванням якості програмного забезпечення:

- ДСТУ 2844-94 [24];
- ДСТУ 2850-94 [25];
- ДСТУ ISO/IEC 12119:2003 [26].

Недоліком цих стандартів є те, що вони оперують не всіма показниками якості, що містяться в міжнародному стандарті ISO/IEC-25010 [27] як продовженні стандарту ISO/IEC-9126 [28; 29].

**2. Вибір методу оцінювання якості освітнього інформаційного наповнення у процесі планування надання освітніх послуг.** Метод оцінювання полягає в застосуванні показників якості стандарту ISO/IEC-25010 до оцінювання якості інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання. Серед усіх показників якості необхідно вибрати ті, які відповідають вимогам формування інформаційного наповнення як програмного забезпечення.

Аналіз метрик, що відповідають характеристикам/підхарактеристикам якості ПЗ за стандартом ISO/IEC-25010, показує, що для оцінювання якості інформаційного наповнення придатними є такі характеристики/підхарактеристики:

- 1) функціональність (Functional suitability):
  - відповідність (Appropriateness);
  - взаємодія (Interoperability);
- 2) корисність (Usability):
  - зрозумілість (Understandability);
  - придатність до навчання (Learnability).

В основу методу оцінювання якості освітнього контенту дисциплін дистанційного навчання покладено показники стандарту ISO/IEC-25010, які задовольняють вимоги до оцінювання якості освітнього інформаційного наповнення та відповідності його до навчальних програм відповідних дисциплін дистанційного навчання.

**2.1. Розроблення показників якості освітнього інформаційного наповнення дисциплін для дистанційного навчання.** Інформаційне наповнення є інформаційним продуктом, і саме тому впливає на якість викладання предметного матеріалу для проведення дистанційного навчання. Формуючи інформаційне наповнення освітніх дисциплін, необхідно надавати таку інформацію, яка б формувала відповідні знання, вміння й навички споживачів освітніх послуг, відповідала вимогам суспільства, стандартам навчальних дисциплін.

Якість освітнього інформаційного наповнення освітніх предметів для дистанційного навчання визначається за набором показників стандарту ISO/IEC-25010.

**2.1.1. Розроблення функціональних показників якості освітнього інформаційного наповнення (далі – ІН) навчальних курсів для дистанційного навчання.** Вимоги щодо оцінювання якості освітнього ІН дистанційних освітніх курсів

задовольняють такі підхарактеристики функціональності:

- відповідність (Appropriateness);
- взаємодія (Interoperability).

Відповідність (Appropriateness) – міра відповідності функцій програмного продукту визначеним і прогнозованим потребам користувачів.

Відповідність за функціональною повнотою визначається за формулою (1):

$$EduQuality_i^{(FS)} = \frac{|Element_i^{(Content)}|}{|Element_i^{(AllContent)}|} \rightarrow 1, \quad (1)$$

де  $|Element_i^{(Content)}|$  – кількість елементів множини інформаційного наповнення, яке подано у  $i$ -й дисципліні дистанційного навчання;  $|Element_i^{(AllContent)}|$  – кількість усіх елементів множини інформаційного наповнення, які передбачені навчальною програмою підготовки слухачів  $i$ -ї дисципліни дистанційного курсу.

Визначимо як функцію наявності відповідних інформаційних елементів, які передбачені відповідною навчальною програмою дисципліни.

Взаємодія (Interoperability) – це міра, за якої програмний продукт забезпечує обмін даними між викладачем і споживачами освітніх послуг.

Ця підхарактеристика визначається за формулою (2):

$$EduQuality_i^{(FI)} = \frac{|Element_i^{(DataExchange)}|}{|Element_i^{(AllData)}|} \rightarrow 1, \quad (2)$$

де  $|Element_i^{(DataExchange)}|$  – кількість елементів множини інформаційного наповнення  $i$ -ї дисципліни дистанційного навчання, за якими споживачі освітніх послуг обмінювалися даними з викладачем;  $|Element_i^{(AllData)}|$  – кількість усіх елементів множини інформаційного наповнення  $i$ -ї дисципліни дистанційного навчання, за якими передбачений обмін даними.

Таким чином, функціональність навчально-методичного контенту дисципліни показує відповідність наявного інформаційного наповнення дисципліни до навчальної програми та рівень взаємодії всіх учасників навчального процесу.

**2.1.2. Розроблення показників якості корисності до використання освітнього інформаційного наповнення у дистанційному курсі.** Серед показників якості корисності до використання освітнього інформаційного наповнення задовольняють такі підхарактеристики:

- зрозумілість (Understandability);
- придатність до навчання (Learnability).

Підхарактеристика «зрозумілість» (Understandability) – це міра, за якої програмний продукт є зрозумілим для користувача. Ця підхарактеристика визначається так:

$$EduQuality_i^{(Understand)} = \frac{|Element_i^{(UnderstandContent)}|}{|Element_i^{(AllContent)}|} \rightarrow 1, \quad (3)$$

де  $|Element_i^{(UnderstandContent)}|$  – кількість елементів множини інформаційного наповнення  $i$ -ї дисципліни дистанційного навчання, яке є зрозумілим для споживачів освітніх послуг;  $|Element_i^{(AllContent)}|$  – кількість усіх елементів множини інформаційного наповнення, які передбачені навчальною програмою підготовки слухачів дистанційного курсу за  $i$ -ю дисципліною дистанційного навчання.

Кількість елементів множини зрозумілого інформаційного наповнення дистанційного курсу визначається за допомогою проведення контрольного тестування серед споживачів освітніх послуг.

Підхарактеристика «придатність до навчання» (Learnability) – це міра, за якої програмний продукт дає змогу самостійно опрацьовувати поданий контент.

Придатність до навчання визначається так:

$$EduQuality_i^{(UL)} = \frac{|Element_i^{(SelfThemeLearning)}|}{|Element_i^{(AllThemeLearning)}|} \rightarrow 1, \quad (4)$$

де  $|Element_i^{(SelfThemeLearning)}|$  – кількість елементів множини інформаційного наповнення  $i$ -ї дисципліни дистанційного навчання, які користувач може опанувати самостійно;  $|Element_i^{(AllThemeLearning)}|$  – кількість усіх тем  $i$ -ї дисципліни дистанційного навчання.

Отже, корисність поданого інформаційного наповнення показує, наскільки зрозумілим є представлений матеріал для споживачів освітніх послуг і придатним для самостійного опрацювання.

**3. Моніторинг результатів вибраних показників якості планування надання освітніх послуг.** Для моніторингу якості інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання на основі вибору показників якості інформаційного наповнення цих дисциплін використано ресурс Віртуального навчального середовища Національного університету «Львівська політехніка» (<http://vns.lpnu.ua>), зокрема навчально-методичне інформаційне наповнення дисципліни «Кадровий менеджмент» 2019/2020 навчального року для студентів 4 курсу спеціальності 029 «Інформаційна, бібліотечна та архівна справа». Моніторинг

показників якості інформаційного наповнення дисципліни «Кадровий менеджмент» здійснювався за такими показниками:

- функціональна відповідність інформаційного наповнення;
- взаємодія за інформаційним наповненням;
- зрозумілість інформаційного наповнення;
- придатність до навчання за інформаційним наповненням.

Для аналізу динаміки показників якості інформаційного наповнення дисциплін вважатимемо значення показника оптимальним, якщо воно належить проміжку  $[0,7 \dots 1]$ , і прийнятним, якщо воно належить проміжку  $[0,4 \dots 0,7]$ .

Показники якості інформаційного наповнення дисципліни «Кадровий менеджмент» на прикладі вебресурсу Віртуального навчального середовища Національного університету «Львівська політехніка» показано на рис. 1.

Отже, як видно з рис. 1, оптимального значення набули показники функціональної відповідності інформаційного наповнення, «зрозумілість інформаційного наповнення» та «придатність до навчання за інформаційним наповненням». Показник «взаємодії за інформаційним наповненням» прийняв значення з інтервалу прийнятих показників якості. Це обумовлено особливістю побудови курсу вивчення вказаної дисципліни відповідно до навчальної програми.

Результати оцінювання показників якості інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання показують ефективність

наданого інформаційного наповнення в межах вивчення дисциплін дистанційного навчання.

**Висновки.** Якість освітнього процесу є важливим і стратегічним питанням внутрішньої політики України в умовах введення особливих умов навчання й неможливості проведення класичного освітнього процесу та надання освітніх послуг. Дистанційне навчання є однією з форм навчання для споживачів освітніх послуг. На сьогодні впровадження дистанційного навчання в освітній процес у всіх ЗВО є вимогою особливого режиму життя всіх учасників освітнього процесу. Якість інформаційного наповнення, з яким працюють споживачі освітніх послуг, є визначальною для ефективного впровадження освітніх послуг в умовах карантинного режиму навчання у ЗВО. Саме тому в роботі проаналізовано вибір показників якості навчально-методичного інформаційного наповнення дисциплін дистанційного навчання. Вибір показників якості інформаційного наповнення дисциплін для дистанційного навчання, що відповідають характеристикам/підхарактеристикам якості програмного забезпечення за стандартом ISO/IEC-25010, дають змогу оцінити рівень відповідності необхідного інформаційного наповнення й рівень взаємодії учасників освітнього процесу (характеристика «функціональність» (Functional suitability) з підхарактеристикою «відповідність» (Appropriateness) та підхарактеристика «взаємодія» (Interoperability)); рівень зрозумілості наданого інформаційного наповнення й придатності до навчання за поданим інфор-

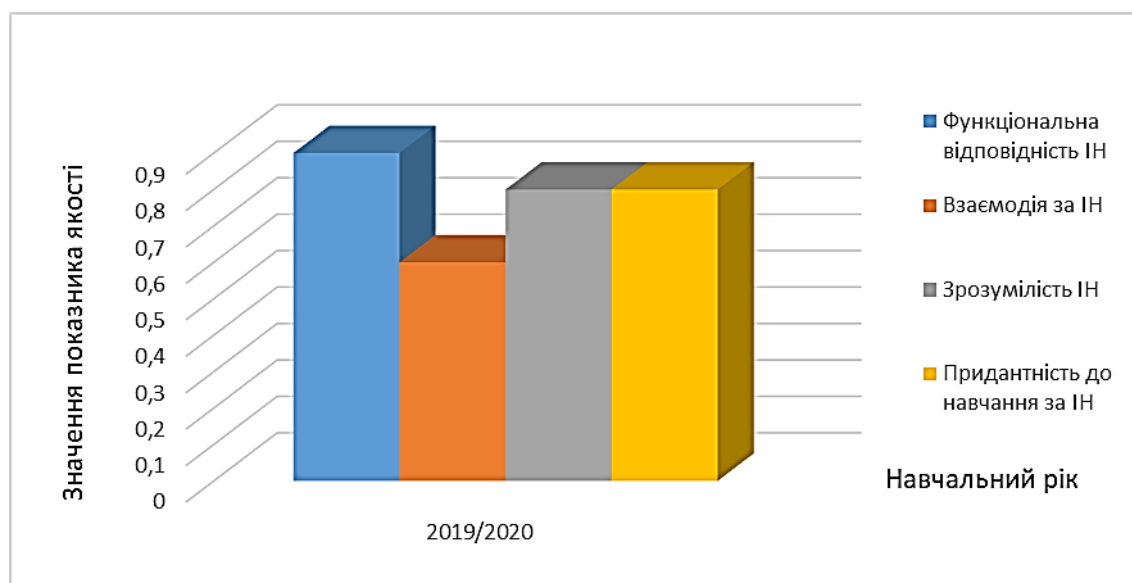


Рис. 1. Показники якості інформаційного наповнення дисципліни «Кадровий менеджмент» на прикладі вебресурсу Віртуального навчального середовища Національного університету «Львівська політехніка»



ційним наповненням (характеристика «придатність до використання» (Usability) з підхарактеристиками «зрозумілість» (Understandability) та «придатність до навчання» (Learnability)). Це

забезпечило практичне оцінювання результатів відповідності й ефективності освітнього процесу за умов впровадження дистанційного навчання закладами вищої освіти.

#### Список літератури:

1. Про освіту : Закон України від 5 вересня 2017 р. № 2145-VIII / Верховна Рада України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1060-12>.
2. Про вищу освіту : Закон України від 1 липня 2014 р. №1556-VII. / Верховна Рада України. URL: <http://zakon0.rada.gov.ua>.
3. Про Національну програму інформатизації : Закон України від 4 лютого 1998 р. №7498-BP / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74/98-%D0%B2%D1%80>.
4. Про затвердження Положення про дистанційне навчання : Наказ Міністерства освіти і науки України від 30 квітня 2013 р. № 703/23235. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0703-13#n18>.
5. Про затвердження Змін до Положення про дистанційне навчання : Наказ Міністерства освіти і науки України від 14 липня 2015 р. № 761. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0923-15>.
6. Про затвердження Вимог до вищих навчальних закладів та закладів післядипломної освіти, наукових, освітньо-наукових установ, що надають освітні послуги за дистанційною формою навчання з підготовки та підвищення кваліфікації фахівців за акредитованими напрямками і спеціальностями : Наказ Міністерства освіти і науки України від 30 жовтня 2013 р. № 1518. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1857-13>.
7. ДСТУ ISO 9000:2007. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів. Київ : Держстандарт України, 2008. 33 с.
8. ДСТУ ISO 9001:2009. Системи управління якістю. Вимоги. Київ : Держстандарт України, 2009. 25 с.
9. Клімова Г.П. Якість вищої освіти: європейський вимір. *Вісник Національного університету «Юридична академія України імені Ярослава Мудрого». Серія «Філософія»*. 2016. № 1. С. 203–210.
10. Harvey L. Defining quality. Assessment and Evaluation in Higher Education. V. 18 (1). 1993. P. 9–34.
11. Parri J. Quality in Higher Education. Management. № 2 (11). 2006. P. 101–111.
12. The European Higher Education Area. Join Declaration of the Ministers of Education. Bologna. 1999. P. 2.
13. Стандарти і рекомендації щодо забезпечення якості в Європейському просторі вищої освіти. Київ : Ленвіт, 2006. 35 с.
14. Жежнич П.І., Шілінг А.Ю. Оптимізація планування надання освітніх послуг у закладах вищої освіти на основі лінгвістичного аналізу. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. Т. 28, № 10. Львів, 2018. С. 129–134.
15. Шілінг А.Ю., Жежнич П.І. Критерії ефективності планування надання освітніх послуг закладам вищої освіти на основі лінгвістичного аналізу. *Сучасний рух науки : V Міжнародна науково-практична інтернет-конференція*. Дніпро, 2019. С. 810–815.
16. Корбут О., Малінко О. Дистанційна освіта: організаційна структура, психолого-педагогічні основи, фінансування і управління. *Директор школи, ліцею, гімназії*. № 6. 2002. С. 38–45.
17. Агейчева А.О., Бухкало С.І. Деякі особливості розвитку дистанційної освіти Швеції. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. № 55 (1028). 2013. С. 162–168.
17. Світовий досвід організації та розвитку університетської системи дистанційного навчання : посібник. ІВО КНЕУ ім. В. Гетьмана, 2013. 40 с.
18. Жадан О.В. Основи управління якістю. Донецьк : АПЕКС, 2004. 99 с.
19. Серов Ю.О. Методи та засоби побудови ефективних віртуальних спільнот на основі вебфорумів : дис. ... канд. тех. наук : Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2010. 165 с.
20. Шілінг А.Ю. Лінгвістичні методи та засоби планування надання освітніх послуг з використанням вебспільнот : дис. ... канд. тех. наук ; Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2019. 184 с.
21. Ришковець Ю.В. Методи та засоби побудови вебгалерей з урахуванням інтересів користувача : дис. ... канд. тех. наук ; Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2013. 180 с.
22. Жежнич П.І. Консолідовані інформаційні ресурси баз даних та знань : навчальний посібник. Львів : видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. 212 с.
23. ДСТУ ISO/IEC 12119-2003. Інформаційні технології. Пакети програм. Тестування і вимоги до якості. ISO/IEC 12119:1994, IDT. Київ : Держспоживстандарт України, 2004. 26 с. (Національний стандарт України).

24. ДСТУ 2850-94. Програмні засоби ЕОМ. Забезпечення якості. Показники та методи оцінювання якості програмного забезпечення. Держстандарт України, 1996. 42 с. (Національний стандарт України. Київ).
25. ДСТУ 2844-94. Програмні засоби ЕОМ. Забезпечення якості. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 1995. 22 с. (Національний стандарт України).
26. ISO/IEC 25010.2:2008. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). System and software quality models. URL: [http://sa.inceptum.eu/sites/sa.inceptum.eu/files/Content/ISO\\_25010.pdf](http://sa.inceptum.eu/sites/sa.inceptum.eu/files/Content/ISO_25010.pdf).
27. ISO/IEC 9126-1:2001. Software engineering. Product quality. Part 1: Quality model. URL: <http://www.iso.org/iso/en/CatalogueDetailPage.CatalogueDetail?CSNUMBER=22749&ICS1=35&ICS2=80&ICS3>.
28. ISO/IEC TR 9126-2:2003. Software engineering. Product quality. Part 2: External metrics. URL: [http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=22750](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=22750).

**Shilinh A.Yu. EVALUATION THE QUALITY OF DISTANCE LEARNING DISCIPLINES' INFORMATION CONTENT IN ACCORDANCE TO ISO / IEC-25010 STANDARD**

*The aim of article are problems of choosing methods for evaluation the quality of distance learning disciplines' information content by higher education institutions. The paper analyzes the existing standards for determining the quality of distance learning disciplines' information content for by the organization of the initial process by higher education institutions. In particular, the legal documents that set requirements for the quality of higher education and state standards for evaluation the quality of software are analyzed. The article defines the role of information content of distance learning disciplines as an information product. It is revealed that high-quality distance learning, as the main form of educational process, is a necessary condition for the provision of educational services by higher education institutions in special domestic political conditions of the state. Defining methods for assessing the quality of distance learning disciplines' information content is an important factor for the effective operation and competitiveness of higher education institutions in the market of educational services, as well as the provision of quality educational services by higher education institutions. In the article, the information content of distance learning disciplines is considered as an information product. The article uses approaches to assessing the quality of information content of distance learning disciplines, which are known for assessing the quality of such information products as software. That is why their quality is determined by a set of indicators of the ISO/IEC-25010 standard. It was found that to assess the quality of distance learning disciplines' information content are suitable characteristics / sub-characteristics of software quality according to ISO/IEC-25010, which allow to evaluate the results of relevance and effectiveness of the educational process for higher education institutions in distance learning. The results of the study are used and can be used for effective planning of educational services and the creation of quality content for distance learning disciplines.*

**Key words:** distance learning, disciplines' information content, higher education institution, quality indicator, ISO / IEC-25010 standard.

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.31

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/23>**Калінчик В.П.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Калінчик В.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ОРГАНІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ТРАКТУ ВИМІРЮВАННЯ Й ОБЛІКУ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

У статті розглядаються особливості побудови автоматизованих систем обліку та контролю енергоресурсів. Показано, що для значної кількості об'єктів є характерною велика розосередженість точок обліку й обсягів контролю. При цьому спостерігається тенденція концентрації датчиків і виконавчих механізмів в окремих вузлах контролю. Показано, що в умовах промислових об'єктів є значний дефіцит ліній зв'язку для організації збирання та передачі інформації, що змушує підвищувати ефективність використання наявних дротових каналів зв'язку, зменшувати надлишковість інформації, що передається, і також використовувати наявні мережі для організації зв'язку. Показано, що для організації інформаційного зв'язку для контролю енергоресурсів найчастіше застосовуються: дротові виділені лінії; силова мережа й бездротові радіосистеми. З'ясовано, що ряд датчиків контролю енергоносіїв для зчитування інформації мають лише числоімпульсний вихід і для них застосовуються дротові лінії зв'язку. Показано, що в дротових лініях зв'язку найбільшого поширення набули енергетичний спосіб уведення сигналів у лінію зв'язку й параметричний спосіб уведення сигналів у лінію зв'язку. Причому параметричний спосіб передачі даних набув найбільшого поширення під час передачі інформації від датчиків до вузлів збирання даних у системах контролю енергоресурсів. Проведено аналіз і дослідження параметричного способу для передачі інформації від двохопозиційних датчиків витрат енергоносіїв. Використовуючи параметричний спосіб уведення інформації, розроблено багатоканальний пристрій передачі даних від двохопозиційних датчиків вимірювання енергоносіїв в автоматизовану систему їх контролю, у якому підвищена точність реєстрації, збільшена довжина дводротової лінії.

**Ключові слова:** енергоресурси, енергоносії, облік, контроль, канали зв'язку, параметричний спосіб, передача даних.

**Постановка проблеми.** Особливістю інформаційних мереж обліку й контролю енергоресурсів є велика розосередженість точок обліку й обсягів контролю. При цьому спостерігається тенденція концентрації датчиків і виконавчих механізмів в окремих вузлах контролю.

В умовах промислових об'єктів є значний дефіцит ліній зв'язку (далі – ЛЗ) для організації збирання та передачі інформації, що змушує підвищувати ефективність використання наявних дротових каналів зв'язку, зменшувати надлишковість інформації, що передається, і також використовувати наявні мережі (наприклад, силові розподільні, комутаційні тощо) для організації зв'язку.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Натепер системи обліку енергоресурсів є тим необхідним механізмом, без якого неможливо оперативно контролювати й аналізувати режим споживання енергоресурсів основними споживачами, вирішувати проблеми економії енергоносіїв, здійснювати необхідні заходи з управління енергоспоживанням.

Структура системи обліку та контролю енергоресурсів значною мірою залежить від топології об'єкта, на якому встановлюється система, відстані від датчиків до диспетчерського пункту, а також від наявності каналів зв'язку для організації передачі даних. Відповідно до Концепції [1], система обліку енергоресурсів повинна

являти собою розподілену багаторівневу систему вимірів, обробки, збереження й передачі даних комерційного обліку й будуватися на принципах відкритості архітектури та розподіленого функціонування. Як правило, системи обліку й контролю енергоресурсів три рівневі, включають рівень об'єкта обліку – нижній (генеруючі компанії, промислові підприємства, комунально-побутовий сектор), регіональний рівень і центральний рівень – верхні рівні.

Причому для організації збирання й обробки інформації Концепція [1] рекомендує застосування глобальної мережі передачі даних, що забезпечує зв'язок між обробкою даних на верхніх рівнях (регіональному й центральному). Мережа повинна бути багатофункціональною (тобто бути основою для системи обліку, системи планування й диспетчерської системи).

Рівень об'єкта обліку повинен включати первинні вимірювачі енергоресурсів і прилади обліку – вимірювальний компонент регіонального рівня. Для забезпечення можливості автоматизованого збирання інформації вимірювачі енергоресурсів повинні мати імпульсний вихід типу «сухий контакт» і/або послідовний інтерфейсний вихід. Залежно від типу телеметричного виходу (імпульсного або інтерфейсного) для організації інформаційного зв'язку для контролю енергоресурсів застосовуються. Згідно з класифікацією [2–4], такі канали зв'язку:

– *дротові виділені лінії*. Цей канал зв'язку застосовується під час побудови систем обліку й контролю енергоресурсів нижнього рівня, укомплектованих вимірювачами, що мають інтерфейсний або імпульсний вихід. Причому як інтерфейсний вихід найчастіше використовуються послідовні інтерфейси RS 485 або «струмова петля» CL. Застосування таких інтерфейсів дає змогу по одній парі передавати інформацію від групи вимірювачів енергоресурсів. До цього класу належать системи, розглянуті в роботах [5–10]. Для обліку енергоресурсів широко використовуються також телеметричні датчики з імпульсним виходом [11–14]. Із використанням таких датчиків побудовано цілий ряд систем, які розглянуті в роботах [14–20]. Особливістю таких систем є те, що для кожного вимірювача енергоресурсів необхідно мати індивідуальний канал зв'язку, що умовах дефіциту вільних ліній зв'язку обмежує їх застосування. Виняток становлять системи [15–17], у яких використано матричний принцип включення датчиків, що дає змогу зменшити кількість ліній зв'язку й підвищити завадостійкість систем;

– *силова мережа*. Системи з використанням силових мереж як каналів зв'язку розглянуті в роботах [21–23]. Такі системи характеризуються низькою швидкістю передачі даних і низькою завадостійкістю й мають обмежену сферу застосування;

– *бездротові радіосистеми*. Для обміну інформації такі системи застосовують бездротові GSM, GPRS, CDMA радіо системи й набули широкого застосування. Приклади реалізації бездротових радіосистем розглянуто в роботах [24–26];

– *комбіновані структури*. Такі структури використовують і дротові, і бездротові лінії зв'язку, мають широке застосування. Приклади реалізації таких систем наведено в працях [5–9; 25; 26].

Ураховуючи, що дротові канали зв'язку мають широке використання під час побудови систем обліку енергоресурсів нижнього рівня, проведемо їх аналіз, зокрема, у системах із первинними вимірювачами з імпульсним виходом. У дротових лініях зв'язку найбільшого поширення набули енергетичний і параметричний способи передачі інформації [27], а в системах обліку та контролю енергоресурсів для передачі даних від датчиків до вузлів збирання даних широкого розповсюдження набув параметричний спосіб введення сигналів у лінію зв'язку.

**Постановка завдання.** Метою роботи є оцінювання параметричного способу передачі інформації для побудови автоматизованих систем обліку та контролю енергоносіїв.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Проведемо аналіз параметричного способу передачі інформації від двохпозиційних датчиків витрат енергоносіїв. На рисунку 1 представлена схема пристрою параметричного введення сигналів у ЛЗ. Для усунення відображень від кінців ЛЗ вони навантажені на хвильові опори  $Z_{\text{х}}$ .

Передавальна функція ЛЗ при входній дії типу зміна параметра лінії (скачок опору навантаження  $R_{\text{н}}$ ) є нелінійною функцією, так як і передавальна функція лінії, і характеристики поширення в ній сигналів залежать від цього ж параметра, який є входним впливом (рисунк 2).

Представимо еквівалентну схему дводротової лінії у вигляді ланцюгової схеми [28–30], що складається з  $n$  однакових осередків у вигляді  $T$ -образних чотириполосників (рисунк 3), у яких опір становить не погонний опір та індуктивність лінії, а погонну ємність і провідність.

Таку кільцеву схему описує система різнице-вих операторних рівнянь:



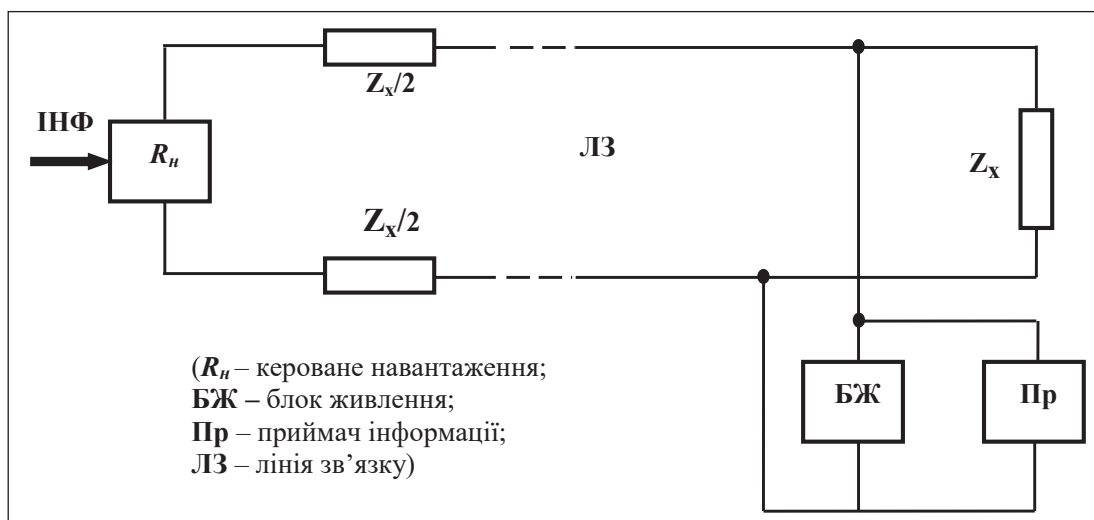


Рис. 1. Пристрій параметричного введення інформації в лінію зв'язку

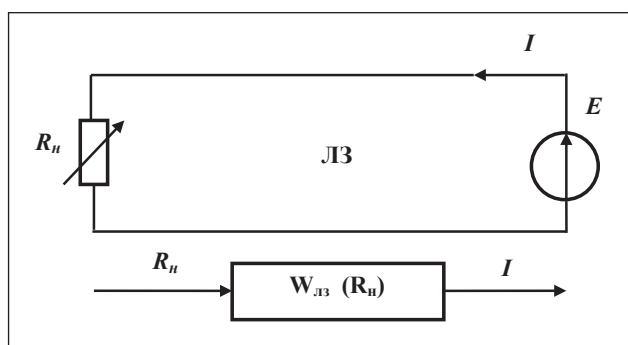


Рис. 2. Передавальна функція лінії зв'язку

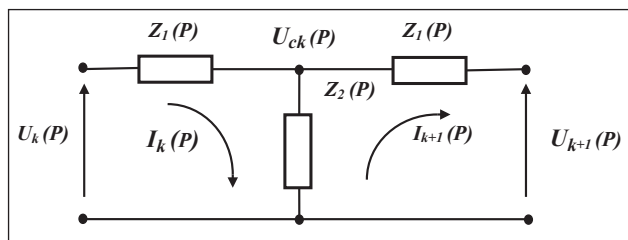


Рис. 3. Еквівалентна схема дводротової лінії зв'язку

$$\begin{cases} (Z_1 + Z_2)I_k(p) - Z_2 I_{k+1}(p) = U_k(p) - U_{ck}^0 \\ Z_2 I_k(p) - (Z_1 + Z_2)I_{k+1}(p) = U_{k+1}(p) - U_{ck}^0 \end{cases} \quad (1)$$

Піддаючи рівняння (1) дискретному перетворенню Лапласа, отримаємо рівняння щодо зображень  $I^*(p, q)$  і  $U^*(p, q)$ :

$$[Z_1 + Z_2 - Z_1 e^q] I^*(p, q) - U^*(p, q) = -Z_2 e^q I^0(p) - U_c^0(p),$$

$$[Z_1 - (Z_1 + Z_2) e^q] I^*(p, q) - e^q U^*(p, q) = (Z_1 + Z_2) e^q I^0(p) - U_c^0(q), \quad (2)$$

де величинами з індексом  $(^0)$  позначені граничні або початкові умови.

Визначимо початкові напруги на ємності  $Z_2$  в довільному  $k$ -му чотириполоснику ланцюгової схеми:

$$U_{ck}^0 = (I_k^0 - I_{k+1}^0) Z_2. \quad (3)$$

Для початкового моменту часу відомий [28] вираз для дискретного Лапласового зображення струму в довільному чотириполоснику:

$$I(q) = \frac{e^q (e^q - 1 - Z_1 / Z_2) I^{00} - e^q U^{00} / Z_2}{e^{2q} - 2e^q (1 + Z_1 / Z_2) + 1}. \quad (4)$$

Тоді, піддаючи (3) дискретному перетворенню Лапласа з урахуванням (4), маємо:

$$U_c^0(q) = e^q Z_2 I^{00} + (1 - e^q) Z_2 I^0(q). \quad (5)$$

Вираз (5) визначається початковими й граничними умовами  $I^{00}$  і  $U^{00}$ .

Рішення (1) з урахуванням (5) для дротової лінії, у якій можна знехтувати погонною індуктивністю й провідністю, може бути представлено у вигляді таких ітеративних виразів, що визначають струм і напругу в лінії зв'язку на  $k$ -ій її ділянці в момент часу  $\theta$ :

$$U(k, \theta) = \frac{U(k-1, \theta-1) R(k+1, \theta)}{R_1 + R(k+1, \theta)} (1 - e^{t/\tau(k, \theta)}) + U(k, \theta-1) e^{t/\tau(k, \theta)},$$

$$i(k, \theta) = \frac{U(k-1, \theta-1)}{R_1 + R(k+1, \theta)} \left( 1 + \frac{R(k+1, \theta)}{R_1} e^{t/\tau(k, \theta)} \right) - \frac{U(k, \theta-1)}{R_1} e^{t/\tau(k, \theta)},$$

$$R(k, \theta) = \frac{U(k-1, \theta-1)}{i(k, \theta)}, \quad (6)$$

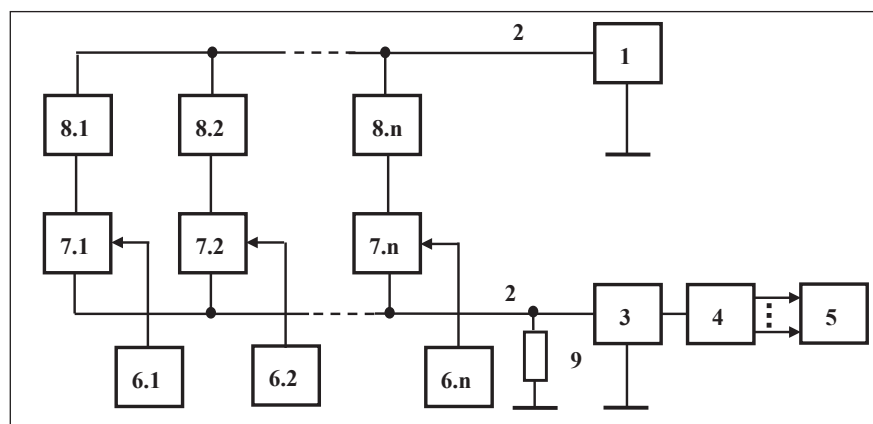


Рис. 4. Багатоканальний пристрій передачі даних

$$\tau(k, \theta) = \frac{cR_l R(k+1, \theta)}{R_l + R(k+1, \theta)},$$

де  $c$  – погонна ємність лінії,  $R_l$  – погонний опір.

Використовуючи параметричний спосіб введення інформації, запропоновано багатоканальний пристрій передачі даних, представлений на рисунку 4. Пристрій містить блок 1 живлення, двохдротову лінію 2 зв'язку, блок 3 узгодження, блок 4 селекторів, який являє собою аналого-цифровий перетворювач, що реєструє блок 5, що становить комбіновану схему й призначений для перетворення двійкового коду в номери датчиків, датчики 6.1–6.N, ключі 7.1–7.N, стабілізатори 8.1–8.N струму й базовий резистор 9, призначений для виділення напруги, пропорційної струму в двохдротовій лінії 2 зв'язку.

Пристрій працює так. Вихідна напруга блоку 1 живлення через базовий резистор 9 подається в двохдротову лінію 2 зв'язку. При спрацюванні будь-якого з датчиків 6.1–6.N замикається відповідний йому ключ 7.1–7.N і в двохдротовій лінії 2 зв'язку тече струм, що задається відповідним стабілізатором 8.1–8.N. Завдяки тому що струми стабілізаторів 8.1–8.N постійні в великому діапазоні напруг, що підводиться до них, струм у двохдротовій лінії 2 зв'язку однозначно задається стабілізаторами 8.1–8.N і не залежить від опору проводів двохдротової лінії 2 зв'язку.

При протіканні струму через базовий резистор 9 на ньому виділяється напруга, пропорційна струму й пов'язана з номерами датчиків 6.1–6.N, що спрацювали, так як струми стабілізаторів 8.1–8.N обрані відповідним чином, наприклад, пропорційно розрядним коефіцієнтам у двійковій системі числення: 2, 4, 8 тощо.

Тобто напруга рівняється:

$$U_\theta = I_\theta R_\theta (x_1 2^0 + x_2 2^1 + \dots + x_N 2^N), \quad (6)$$

де  $I_\theta$  – базовий струм (струм стабілізаторів 8.1, ..., 8.n),  $R_\theta$  – опір базового резистора 9,  $X \{x_1, \dots, x_N \cdot 2^N\}$  – цифровий код стану ключів 6.1–6.N ( $x_i$  приймає значення (0V1)).

Напруга, що знімається з базового резистора 9, масштабується блоком 3 узгодження й за допомогою блоку 4 селекторів перетворюється у двійковий код, що надходить у реєструючий блок 5, у якому встановлюється відповідність двійкового коду номерам датчиків 6.1–6.N, що спрацювали, і здійснюється індикація їх стану або виконується перетворення сигналів для введення в ЕОМ.

Отже, застосування стабілізаторів 8.1–8.N струму дає змогу усунути вплив електричного опору двохдротової лінії 2 зв'язку на результати вимірювання, завдяки чому підвищена точність реєстрації, збільшена довжина двохдротової лінії 2 зв'язку й кількість обслуговуваних датчиків 6.1–6.N.

**Висновки.** Системи обліку енергоресурсів є механізмом для вирішування проблем економії енергоносіїв, здійснення необхідних заходів з управління енергоспоживанням. Структури систем обліку та контролю енергоресурсів залежать від топології об'єкта, відстані від датчиків до диспетчерського пункту й від наявності каналів зв'язку для організації передачі даних. Вибір типу каналу зв'язку залежить від типів телеметричних виходів вимірювачів енергоресурсів (імпульсного або інтерфейсного). Для вимірювачів з імпульсним виходом застосовуються виключно дротові канали зв'язку, у яких для вводу інформації в основному розповсюджений параметричний спосіб. Отримано аналітичні залежності параметрів дротової лінії зв'язку. Використовуючи параметричний спосіб введення інформації, запропоновано багатоканальний пристрій передачі даних.

## Список літератури:

1. Концепція побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку / А.В. Праховник, В.П. Калінчик, Ю.В. Тимошенко та інші. *Інформаційний бюлетень НКРЕ*. 2002. № 11. С. 230–261.
2. Саїф К. Мухамед. Моделі і технологія вибору структури технічних засобів інформаційних систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06. Харків, 2013. 20 с.
3. Саїф К. Мухамед. Особенности построения информационных систем. *Системы обработки информации*. 2011. Выход 7 (97). С. 30–33.
4. Аналіз вимірювальних каналів систем обліку електроенергії / В.П. Калінчик, П.В. Кульбачний, В.В. Прокопенко, Л.І. Несен / *Приладобудування: стан і перспективи* : матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції. Київ, 2015. С. 224–225.
5. Калінчик В.П., Несен Л.І., Суменко К.Ю. Типові структури автоматизованих систем обліку електроенергії / НТУУ «КПІ» Н.-д. ін-т автоматики та енергетики «Енергія». Київ, 2013. 8 с.: іл.
6. Тубинис В.В. Управление электропотреблением за рубежом. *Энергонадзор и энергобезопасность*. 2006. № 3. С. 31–44.
7. Коробко І.В., Кузьменко П.К. Моніторинг розвитку систем диспетчеризації та контролю обліку теплової енергії в Україні. *Вісник ЖДТУ*. 2005 № 4 (35). С. 90–93.
8. Автоматизована система комерційного обліку електроенергії ВАТ ЕК «Хмельницькобленерго» / О.Л. Шпак, П.Д. Луців, А.В. Праховник, В.П. Калінчик, О.О. Шиянов. *Електрические сети и системы*. 2010. Спецвыпуск. С. 22–31.
9. Автоматична система контролю і обліку енергоносіїв. Київ, 2019. URL: [https://novator-tm.com/index\\_uk.php?id=meters-askoe](https://novator-tm.com/index_uk.php?id=meters-askoe).
10. Рожков П.П., Рожкова С.Е. Контроль та облік електричної енергії: конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 107 с.
11. Калінчик В.П. Датчики технологического учета расхода электроэнергии. *Проблемы та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії* : матеріали XXXVIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. Переяслав-Хмельницький, 2017. С. 212–214.
12. Поповкин Ю.М., Тупиков А.Н. Импульсный преобразователь к счетчику расхода электроэнергии. *Промышленная энергетика*. 1983. № 5. С. 14–15.
13. Нестерчук Д.М. Електромагнітний витратомір-лічильник для системи обліку теплової енергії. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2017. Вип. 7. Т. 1. С. 175–186.
14. Паракуда В., Орлов В. Коновалов В. Автоматизована система обліку енергоресурсів споживачами. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2008. № 68. С. 66–69.
15. Комплекс технических средств информационно-измерительной и управляющей системы ЦТ 5000 / А.В. Праховник, В.П. Калінчик, С.В. Колесников, Н.В. Сандрацкий. *Применение микропроцессоров и ЭВМ для экономии энергоресурсов в промышленности и быту*. Ленинград : Знание, 1988. С. 21–26.
16. Калінчик В.П., Разумовский О.В. ІТЕК – учет и контроль энергоресурсов. *Управління енерговикористанням* : праці 2-ї Міжнародної конференції. Львів : Тасіс, 1997 С. 27–28.
17. Variety of System of Energy composition metering and control ITEK / A. Prakhovnik, V. Kalinchik, O. Razumovsky. *Energy Efficiency and Ecology*. 1997. № 4. Р. 6–8.
18. Черемисин Н.М., Зубко В.М. Автоматизация учета и управления электропотреблением / МОН України. Киев, 2004. 177 с.
19. Автоматизована система комерційного обліку електроенергії. Київ, 2009. URL: <https://www.bestreferat.ru/referat-104931.html>.
20. Донцов І.Д. Автоматизована система обліку та контролю енергоресурсів. Київ, 2018. 90 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23364>.
21. А.С. 1206885. Устройство для автоматического управления электрической нагрузкой предприятия / В.А. Абрамов, В.П. Калінчик, А.В. Праховник и др. Опубл. 23.01.86; Бюл. № 3. 4 с.
22. Тубинис В.В. Новые автоматизированные системы учета электроэнергии для бытовых потребителей со сбором информации от электросчетчиков по силовой сети. *Вестник Главгосэнергонадзора России*. 1998. № 1. С. 22–29.
23. Розробка автоматизованої системи контролю енергоспоживання промислового виробництва. Тернопіль, 2019. URL: [http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/29561/2/dyplom\\_Baran.pdf](http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/29561/2/dyplom_Baran.pdf).
24. Святний В.А., Мірошкін О.М., Гриша В.В. Реалізація зв'язку з системою АСКОЕ через GSM мережу. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2017. № 19 (1241). С. 64–71.
25. Системы учета электроэнергии в условиях функционирования Smart Grid технологий / А.В. Праховник, В.П. Калінчик, А.В. Волошко, О.В. Коцарь. *Енергетика та електрифікація*. 2012. № 1. С. 51–58.
26. Калінчик В.П., Саблін О.Л. Основні положення щодо побудови систем обліку електроенергії в умовах енергоринку. *Проблемы та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії* : матеріали Х Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. Переяслав-Хмельницький, 2018. С. 182–183.

27. Расчет параметров устройства регистрации сигналов от датчиков с двухпозиционным выходом / А.А.Петров, В.П.Калинчик, В.А.Карунный, В.А.Нестеренко. *Изв. вузов СССР «Энергетика»*. 1989. № 12. С. 41–44.
28. Цыпкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. Москва : Гос. изд. физ.-мат. лит., 1963. 968 с.
29. А.С. 1580168. Устройство для регистрации сигналов датчиков / В.А. Абрамов, С.П. Бацукин, В.П. Калинчик и др. Опубл. 23.07.1990. Бюл. № 27. 3 с.
30. Калинчик В.П., Петров А.А., Праховник А.К. Организация информационных связей тракта измерений и учета электроэнергии / НТУУ «КПИ», Н.-и. ин-т автоматики и энергетики «Энергия». Киев, 2011. 10 с.: ил.

**Kalinchik V.P., Kalinchik V.V. ORGANIZATION OF INFORMATION LINKS OF ENERGY MEASUREMENT AND ACCOUNTING TRACT**

*The article considers the peculiarities of building automated systems of accounting and control of energy resources. It is shown that a large number of objects are characterized by a large dispersion of metering points and amount of control. At the same time the tendency of concentration of sensors and actuators in separate control units is observed. It is shown that in the conditions of industrial facilities – there is a significant shortage of communication lines for the organization of collection and transmission of information, which forces to increase the efficiency of existing wired communication channels, reduce redundancy of transmitted information and use existing networks for communications organization. It is shown that for the organization of information communication for control of energy resources are most often used: wired dedicated lines, power network and wireless radio systems. It has been established that some energy control sensors have only a pulse output for reading information and use wired communication lines. It has been shown that the power method of inputting signals to the communication line and the parametric method of inputting signals to the communication line have become the most widespread in wired communication lines. Moreover, the parametric method of data transmission has become the most common in the transmission of information from sensors to data collection nodes in energy control systems. The analysis and researches of a parametric way for information transfer from two-position sensors of energy carriers expenses are carried out. Using a parametric method of information input, a multi-channel data transmission device from two-position energy measurement sensors to an automated system for their control has been developed, in which registration accuracy is increased and the length of a two-wire line is increased.*

**Key words:** energy resources, energy carriers, accounting, control, communication channels, parametric method, data transmission.



**Коваленко Г.В.**

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

## ТЕПЛОВІДДАЧА ПІД ЧАС НЕСТАЦІОНАРНОГО НУКЛЕАТИВНОГО КИПІННЯ НАНОРІДИН ІЗ МАЛОТЕПЛОПРОВІДНОЮ ТВЕРДОЮ ФАЗОЮ

Стаття присвячена тепловіддачі під час нуклеативного (бульбашкового) нестационарного кипіння нанорідин, створених на основі дистильованої води. Речовиною твердої фази були частинки як із високою теплопровідністю (розчини коларголу), так і з низькою теплопровідністю (аеросил, рутил, розширений графіт). У серії дослідів вагові концентрації твердої фази були в діапазоні від нуля до 3%. У всіх експериментах пробний сталевий циліндр нагрівався в муфельній печі до однієї і тієї ж температури ( $\approx 526^\circ\text{C}$ ) і потім занурювався в посудину з нанорідиною, властивості якої досліджувались. При цьому реєструвались температури центра циліндра та його поверхні, а також початкова і кінцева температури охолоджуючої рідини. Для порівняння виконувались досліди з чистою дистильованою водою. Посудина з охолоджуючою рідиною була обладнана п'єзокерамічним сенсором звукових коливань, сигнал якого, переданий через аналого-цифровий перетворювач на комп'ютер, дозволяв фіксувати зміни характеру процесу охолодження пробного циліндра. Інтенсивність тепловіддачі при бульбашковому кипінні охолоджуючої нанорідини оцінювалась по середній швидкості остигання центра пробного циліндра.

Нанорідини, тверда складова яких мала розвинену поверхню, характеризувались збільшеним тепловим потоком. У нанорідинах з частинками срібла (коларгол) і рутилу при збільшенні концентрації твердої фази в діапазоні 0–1,6% спостерігалось зменшення інтенсивності тепловіддачі. Залежність швидкості остигання пробного циліндра від концентрації твердої фази для нанорідини з розширеним графітом характеризується максимумом при концентрації 0,25%. Велика швидкість остигання сталого циліндра при нуклеативному кипінні була зафіксована в дослідях з використанням в якості твердої складової аеросилу і розширеного графіту. Обидві останні речовини характеризуються малим коефіцієнтом теплопровідності і великою питомою поверхнею.

**Ключові слова:** бульбашкове кипіння нанорідин, нанорідини з твердими частками з низькою теплопровідністю.

**Постановка проблеми.** Суспензії, які містять тверді частинки з розміром меншим ніж 100 нм (нанорідини), звернули на себе увагу, коли з'ясувалося, що вони мають аномально високу теплопровідність при малих об'ємних частках твердої фракції [1]. Ця їх властивість зробила використання нанорідин перспективним в хімії, електроніці, медицині, енергетиці, при захисті навколишнього середовища.

Наночасточки дозволяють значно збільшити тепловіддачу однофазної рідини [2; 3]. Під час кипіння нанорідин виявлено значне збільшення коефіцієнта тепловіддачі і критичного теплового потоку [4].

Однак відносно теплообміну під час кипіння нанорідин існують дві групи експериментальних даних. Так, експерименти з наночастинками  $\text{CuO}$  в воді [5] показали, що при бульбашковому кипінні коефіцієнт тепловіддачі і критичний тепловий потік збільшуються разом із зростанням масової концентрації наночастинок до 1%. При більших

концентраціях наночастинок тепловіддача погіршується.

У роботах Дерягина [6] ці явища пояснюються нестійкістю дисперсних систем. Нанорідини утворюються часточками, які складаються з невизначеної (часто великої) кількості молекул. У порівнянні з розчинами такі системи мають додатковий ступінь свободи і їх стабільність може мінятися способами не властивими «справжнім» розчинам.

Відомі три види стабільності колоїдних систем:

1. Фазова стабільність – стійкість до розшарування.
2. Стабільність дисперсного складу (незмінність розподілу частинок по розмірам).
3. Агрегативна стабільність (відсутність коагуляції), яка можлива через те, що сили взаємодії між молекулами мають радіус дії більший, ніж відстань між молекулами.

Класичні моделі для суспензій (Einstein, Nielsen) погано прогнозують в'язкість нанорідин.

Автори [7] пояснюють деякі особливості плівкового кипіння нанорідин, зокрема накопичення наночастинок на поверхні нагрівання, з урахуванням броунівського і термофоретичного механізмів дифузії.

Наночастинки благородних металів (зокрема срібла) самі по собі схильні до агломерації. Для підвищення стійкості суспензій з такими частками використовують різні диспергенти. Ці речовини створюють на поверхні наночастинок поверхневі заряди, що призводить до відмінності у властивостях нанорідин [2] у різних дослідників. Це може бути причиною розбіжностей їх характеристик.

Предметом дослідження в царині нанорідин є наявність (або відсутність) критичного розміру твердих частинок, вплив фізичних характеристик твердої фази на специфічні ефекти.

Максимальне збільшення критичного теплового потоку під час кипіння нанорідин становить 300–450%. Обнадійливі властивості нанорідин покращують перспективи їх застосування в таких галузях теплотехніки, як теплові труби або загартовування металевих деталей.

Таким чином, дослідження нестационарного кипіння нанорідин в широкому температурному діапазоні, при охолодженні нагрітої металевої деталі є актуальним.

**Постановка завдання.** Основним завданням роботи є накопичення експериментальних даних в області кипіння нанорідин. Одночасна фіксація додаткових параметрів дослідів – звуку, який виникає при зміні характеру теплообміну, дозволяє зв'язати між собою окремі характеристики цього складного явища.

**Матеріали і методи.** Схема експериментального стенду показана на рис. 1.

Для експериментів використовувався циліндр з нержавіючої сталі 1Х18Н9Т з наступними розмірами – діаметр циліндру – 15 мм, висота циліндру – 40,0 мм, радіус закруглення між циліндричною поверхнею і торцем – 0,1 мм. По осі циліндра на глибину половини його висоти висвердлювався канал діаметром 1 мм. У канал запресовувалася хромель-алюмелева термопара. Гарячий спай термопари приварювали до дна каналу контактним зварюванням.

До бокової поверхні циліндру на середині його висоти приварювався розплесканий спай другої хромель-алюмелевої термопари (зовнішньої) і місце зварювання зашліфовувалось. Холодні спаї обох термопар термостабілізувались.

Перед кожним дослідом циліндр з термопарами поміщалися в муфельну піч, для нагрівання до початкової температури (526°C). Після достатньої витримки циліндр з термопарами виймався з печі і занурювалися в керамічну посудину з охолоджуючою рідиною, що досліджувалась.

Для фіксації звуку, що виникає під час кипіння до бокової стінки посудини з охолоджуючою рідиною спеціальним кріпленням притискався п'єзокерамічний сенсор.

Сигнали термопар, що вимірювали температури в центрі циліндра і на зовнішній поверхні, а також звуковий сигнал подавалися через аналого-цифровий перетворювач на комп'ютер і на частотомір.

Запис на комп'ютері температур в центрі циліндра і на його поверхні давала можливість розв'язувати зворотну задачу теплообміну.

Характерна зміна звукового і температурного сигналів вказувала на початок і кінець нуклеативного кипіння.

Властивості наповнювачів нанорідин зведені в таблицю 1.

Були досліджені процеси нестационарного кипіння наступних нанорідин, утворених на основі дистильованої води з 1. аеросилом –  $\text{SiO}_2$ ; 2 розширеним графітом – G; 3. рутилом -  $\text{TiO}_2$ ; 4. коларголом (колоїдне срібло Ag); Швидкість охо-

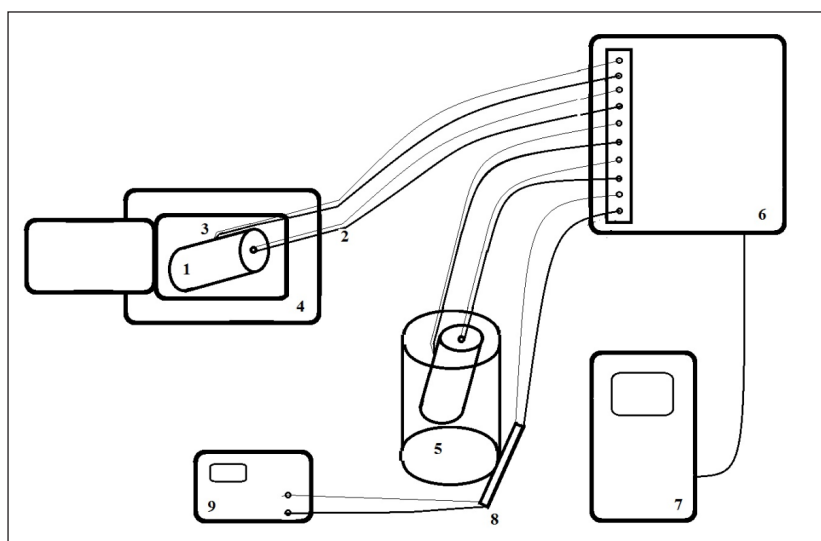


Рис. 1. Схема експериментального стенду: 1- пробний циліндр; 2- центральна термопара; 3- зовнішня термопара; 4 – муфельна піч; 5- посудина з досліджуваною рідиною; 6- аналого-цифровий перетворювач; 7- комп'ютер; 8- п'єзокерамічний сенсор; 9- частотомір

лодження центра дослідного циліндра в різних нанорідинах показана на рис. 2. Для порівняння виконувались досліди з дистильованою водою.

У процесі охолодження циліндра можна виділити чотири зони. Утворення нестационарної плівки, що кипить. У наведеному досліді вона існує 2,4 секунди. Далі поверхню циліндра огортає майже суцільна парова плівка, поверхня якої вібрає, але контакт з нагрітим металом циліндра відбувається рідко. Циліндр остигає, тепловий потік від його поверхні до рідини зменшується і, нарешті (через 11,8 секунди від початку досліді), досягає критичного, і плівкове кипіння переходить в нуклеативне (бульбашкове). Окремі бульбашки інтенсивно перемішують рідину біля металевої поверхні і інтенсивність теплообміну збільшується в рази. Бульбашкове кипіння продовжується 1,4 секунди і завершується конвективним теплообміном. За характеристику середньої інтенсивності теплообміну при бульбашковому кипінні вибиралось відношення різниці температур початку і кінця бульбашкового кипіння до

інтервалу часу його існування BbV. Кут нахилу кривої TC від часу свідчить про значне зростання середнього теплообміну в період бульбашкового кипіння. Зміна характеру теплообміну відзначається різким збільшенням амплітуди BbV звукового сигналу, який формується (скоріш за все) в момент руйнації парової бульбашки.

Швидкість охолодження центра дослідного циліндра при бульбашковому кипінні різних нанорідин показано на рис. 2. Найбільша швидкість охолодження була досягнута в водній суспензії аеросилу з концентрацією 1,2%. (вагових). Збільшення швидкості охолодження в порівнянні з процесом в дистильованій воді становило 3,92 рази. Результати експериментів з дистильованою водою добре узгоджувались з даними комп'ютерних розрахунків з [8]. Швидкості охолодження при бульбашковому кипінні розчинів коларголу і рутилу порівняно мало відрізняються від швидкості охолодження під час кипіння дистильованої води. Причому в діапазоні концентрацій від 0% до 1,8% мають схильність до зменшення з ростом концен-

Таблиця 1

## Властивості речовин твердої фази суспензій

№	Назва, формула	Розміри частинок, нм	Питома поверхня, BET; м <sup>2</sup> /г	Питома маса, г/см <sup>3</sup>	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К)
1	Аеросил, SiO <sub>2</sub>	10-40 5-15	50-380	2,2	1,76
2	Розширений графіт, C	0,70-0,72	220-250	1,6	3-5 поперек листа 130-200 вздовж листа
3	Рутил, TiO <sub>2</sub>	42		4,3	22,06
4	Коларгол, Ag	3,3-4,8		10,5	429

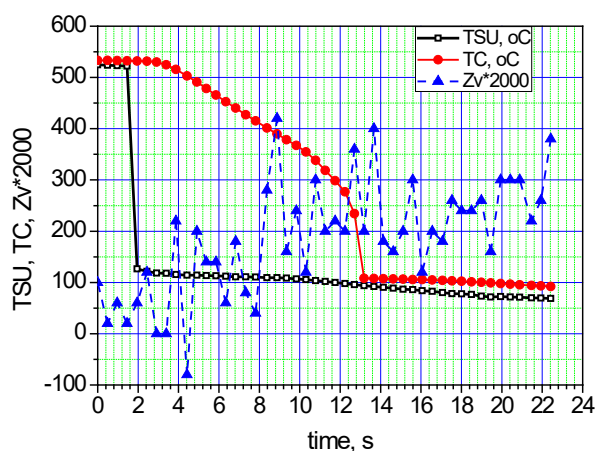


Рис. 2. Процес охолодження сталого циліндра в розчині аеросилу з концентрацією  $C=0,928\%$   
*TSU* – температура на поверхні циліндра,  
*TC* – температура в центрі циліндра,  
*Zv\*2000* - звуковий сигнал, що супроводжує кипіння

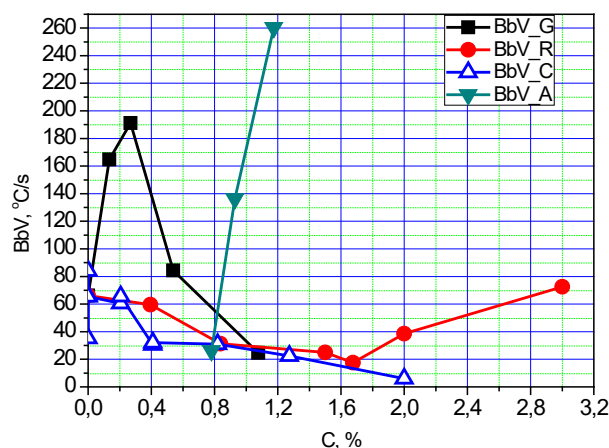


Рис. 3 Швидкість охолодження центра дослідного циліндра під час бульбашкового кипіння різних нанорідин, що містять:  
*BbV\_G* – графіт розширений, *BbV\_R* – рутил,  
*BbV\_C* - коларгол; *BbV\_A* – аеросил

трації. Чіткого впливу концентрації добавок на поверхневий натяг нанорідини не виявлено. А от питома поверхня БЕТ, яка у деяких речовин відрізняється на порядок, може бути причиною значної відмінності процесів бульбашкового кипіння. У розширеного графіту БЕТ=350 м<sup>2</sup>/г, у деяких сортів аеросилу БЕТ досягає 380 м<sup>2</sup>/г.

Збільшення концентрації речовини з великою питомою поверхнею можна помітити по зростанню амплітуди звукового сигналу під час кипіння. Свій вклад в «нестандартність» впливу на теплообмін вносить анізотропія теплопровідності. У розширеного графіту вона залежно від напрямку може перевершувати 60 разів.

Не виключено, що позитивний вплив аеросилу на розширення зони бульбашкового кипіння можна пояснити вдалим поєднанням малих роз-

мірів його часточок і дуже низькою теплопровідністю. Крім того, в нього добрі адсорбційні властивості, особливо до полярних речовин.

**Висновки.** Нанорідини є перспективними теплоносіями в різних галузях техніки.

Область застосування нанорідин не повинна обмежуватися конвективним теплообміном, де вони вже довели свої унікальні властивості, але може бути розширена на процеси їх кипіння.

У разі якщо вдасться налагодити виробництво стійких нанорідин (наприклад з використанням аеросилу), їх застосування можливе в процесах загартування і в теплових трубах, тому що інтенсифікація теплообміну, викликана присутністю в рідині наночастинок превалює над зменшенням поверхневого натягу, необхідного для пересування рідини в ґнотових системах.

#### Список літератури:

1. L. Godson, B. Raja, D. Mohan Lal, S. Wongwises, Enhancement of heat transfer using nanofluids – an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol.14. Pp. 629–641.
2. Y. Wenhua, D. M. France, J. L. Routbort, and S.U.S. Choi, Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements, *Heat Transfer Eng.* 29 (2008) 432–460.
3. P. Keblinski, S.R. Phillpot, S.U.S. Choi, J.A. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *Int. J. Heat Mass Transfer* 45 (2002) 855–863.
4. Б.И. Бондаренко, В.Н. Морару, С.В. Сидоренко, Д.В. Комыш, А.И. Ховавко, Наножидкости для энергетики: влияние стабилизации на критический тепловой поток при кипении, *Письма в ЖТФ*, 2012, том 38, вып. 18. Стр. 68–81.
5. W. M. Rohsenow, A method of correlating heat transfer data for surface boiling liquids // *Transactions of ASME* 74 (1952) 969–979.
6. Б.В. Дерягин Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. Москва : Наука, 1986. 206 с.
7. A. A. Avramenko, I. V. Shevchuk, A. I. Tyrinov, D. G. Blinov, Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015. V. 92. C. 106–118.
8. G. V. Kovalenko, N. I. Kobasko, Modeling of the Unsteady-State Boiling Process in Water Quenching of Metals. *Heat Transfer-Soviet Research*, Vol. 20, 1, January-February 1988. P. 69–78.

#### Kovalenko G.V. HEAT TRANSFER ON NON-STATIONARY NUCLEATIVE BOILING OF NANOFLUIDS WITH A SOLID PHASE HAVING A LOW HEAT CONDUCTIVITY

*The paper is dedicated to heat transfer at the nucleative (bubble) unsteady boiling of nanofluids made from distilled water. The solid phase substance consisted of both particles with a high thermal conductivity (collargol solutions) and a low thermal conductivity (aerosil, rutile, expanded graphite). The weight concentrations of the solid phase were in the range from 0% to 3%. In all experiments, the test steel cylinder was heated to the same temperature ( $\approx 526^\circ\text{C}$ ) in the muffle furnace and then immersed in the vessel with the nanofluent, the properties of which were investigated. The temperature of the center of the cylinder and its surface, as well as the initial and final temperature of the coolant were recorded. For comparison, experiments were carried out with the pure distilled water. The coolant vessel was equipped with a piezoceramic sensor whose signal transmitted through an analog-to-digital converter to the computer was able to fix changes in the character of the cooling process of the tested cylinder. The intensity of heat transfer during the bubble boiling of the cooling nanofluid was estimated by the average cooling rate of the center of the tested cylinder.*

*The nanofluids the solid component of which had developed surfaces were characterized by increased heat flux. A decrease in heat transfer intensity was observed in nanofluids with silver (collargol) and rutile particles while increasing the solid phase concentration in the range 0 – 1.6%. The dependence of the cooling rate of the tested cylinder on the concentration of the solid phase for nanofluid with expanded graphite was characterized by a maximum at a concentration 0.25%. The both latter substances were characterized by a low coefficient of thermal conductivity and a large specific surface area.*

**Key words:** nucleate boiling of nanofluids, nanofluids with solid particles with low heat conductivity.



УДК 621.311.1

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/25>**Сінчук О.М.**

Криворізький національний університет

**Бойко С.М.**

Криворізький національний університет

**Некрасов А.В.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Ножнова М.О.**

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

**Федь М.М.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

## ДО ПИТАННЯ ПРОЄКТУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ В УМОВАХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Метою роботи є дослідження теоретичних засад проєктування вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств. Децентралізовані енергосистеми з використанням джерел розосередженої генерації на базі відновлювальних джерел енергії можуть бути надзвичайно прибутковою сферою для капіталовкладень, якщо є можливість розміщувати джерела генерації енергії поблизу споживачів. Наявні методики для проєктування системи електропостачання віддалених споживачів в основному розглядають як альтернативу централізованому електропостачанню електропостачання шляхом генерації електроенергії на базі джерел розосередженої генерації (далі – ДРГ), у тому числі вітроенергетичних станцій. На гірничорудних підприємствах актуальним і можливим є впровадження в загальну структуру систем електроживлення вітроенергетичних станцій. Водночас з метою достатньо енергоефективного використання систем електроживлення необхідно ґрунтовно аналізувати питання, пов'язані з режимами роботи енергетичного обладнання на етапі їх проєктування. У статті розглянуто теоретичні засади підходу до проєктування вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств.

**Ключові слова:** вітроенергетична станція, енергетичне обладнання, електропостачання гірничорудних підприємств, проєктування системи електропостачання.

**Постановка проблеми.** Децентралізовані енергосистеми з використанням джерел розосередженої генерації, на базі відновлювальних джерел енергії можуть бути надзвичайно прибутковою сферою для капіталовкладень, якщо є можливість розміщувати джерела генерації енергії поблизу споживачів [1].

Наявні методики для проєктування системи електропостачання віддалених споживачів в основному розглядають як альтернативу централізованому електропостачанню, електропостачання шляхом генерації електроенергії на базі джерел розосередженої генерації, у тому числі вітроенергетичних станцій (далі – ВЕС).

Між тим освоєння потенціалу ВЕС – це технічно важко реалізоване в наш час завдання, яке

пов'язане з низькою щільністю потоку енергії від ВЕС і залежністю їх від природних умов. Вартість отримання енергії, хоча вона й знижується щорічно, залишається значно вищою, ніж у традиційних енергоресурсів, а потрібних кардинальних технічних рішень поки нема.

На часі є певні територіальні обмеження щодо впровадження ВЕС поблизу об'єктів електроспоживання. Однак, зважаючи на те що залізнична сировина видобувається як відкритим (кар'єр), так і підземним (шахта, рудник) способами на великих площах, непридатних для сільськогосподарських робіт, гірничорудні підприємства (далі – ГРП) мають стати полігоном для впровадження ВЕС у структури розподільчих систем цих підприємств [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Враховуючи той факт, що залізородні підприємства належать до класу енергоємних, а у світі постійно точиться конкурентна боротьба за ринки збуту залізородної сировини (далі – ЗРС), оскільки залізородна промисловість посідає важливе місце в економіці багатьох країн світу, можна вважати актуальним науково-практичним завданням розроблення теоретичних засад, математичних моделей і методів упровадження джерел розосередженої генерації в структуру комплексу електропостачання-електроспоживання ГРП [3].

Завданнями розвитку розподіленої генерації та підвищення ефективності режимів роботи систем електропостачання з ДРГ в різні часи займалися Y.M. Atwa, R.C. Dugan, P. Mahat, K. Maki, H.I. Voropay, O.B. Kyrylenko, B.V. Kozirskyi, S.O. Kudrya, B.V. Kulik, P.D. Lezhnyuk, B.A. Popov, A.V. Prakhovnik, Yu.I. Tugay, O.S. Yandulskyi та інші вчені [1–8].

**Постановка завдання.** Розроблення теоретичних засад проєктування вітроенергетичних станцій в умовах гірничородних підприємств.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Особливістю роботи вітрогенератора є його робота в умовах безперервної пульсації швидкості вітру.

Простою схемою ВЕС, яка представлена на рис.1, є паралельна робота декількох генераторів на загальні шини з видачею потужності через підвищувальний трансформатор у лінію високої напруги. В указаній схемі до джерела живлення з напругою  $U_s$  через трансформатор з активним опором  $R_t$  й індуктивністю  $L_t$  під'єднані: шунт  $R_{ш}$ ,  $L_{ш}$ , два асинхронних генератори  $G_1, G_2$  й сумарна ємність їхньої системи збудження  $C$ .

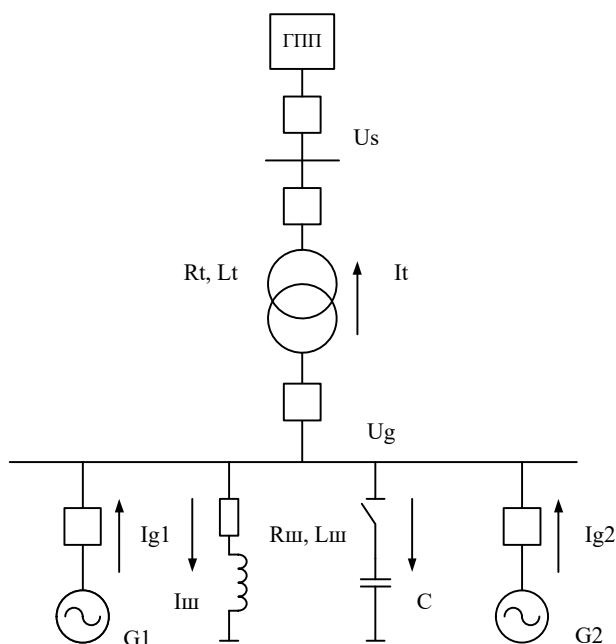


Рис. 1. Схема заміщення вітроенергетичної станції

Диференційні рівняння трансформатора й шунта в осях  $x, y$ ,  $\omega_k$  мають вигляд:

$$\begin{aligned} pI_t &= \frac{1}{L_t} \cdot (U_g - U_s) - \frac{R_t}{L_t} \cdot I_t - j \cdot \omega_k \cdot I_t; \\ pI_{ш} &= \frac{1}{L_{ш}} \cdot U_g - \frac{R_{ш}}{L_{ш}} \cdot I_{ш} - j \cdot \omega_k \cdot I_{ш}. \end{aligned} \quad (1)$$

Асинхронний генератор (далі – АГ) з конденсаторним самозбудженням являє собою простий асинхронний електродвигун з коротко замкнутим ротором, у якому відбувається електромагнітне перетворення механічної енергії обертання ротора на електричну енергію генеруючого струму.

Відповідно до рівнянь загальної електричної машини диференційні рівняння АГ можна представити у вигляді [2]:

$$\begin{aligned} 0 &= U_g + R_s \cdot I_g + p\psi_s + j \cdot \omega_k \cdot \psi_s; \\ 0 &= R_r^{(1)} \cdot I_r^{(1)} + p\psi_r^{(1)} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \psi_r^{(1)}; \\ 0 &= R_r^{(2)} \cdot I_r^{(2)} + p\psi_r^{(2)} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \psi_r^{(2)}; \\ p\omega &= \left( \frac{1}{j} \right) \cdot (M_T - M_E), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $R_s, R_r^{(i)}, L_{\sigma s}, L_{\sigma r}^{(i)}, i=1,2$  – активні опори та індуктивності розсіювання статора й ротора;  $L_m$  – індуктивність взаємодії;  $\psi_s, \psi_r^{(i)}, \psi_m$  – потокозчеплення статора, роторних контурів і гілки намагнічування;  $I_g, I_r^{(i)}$  – токи статора та роторних контурів;  $M_E$  – електромагнітний момент генератора;  $M_T$  – момент обертання вітротурбіни.

До включення конденсаторів збудження АГ напруга  $U_g$  може бути визначена з балансів струмів у вузлі в диференціальній формі:

$$pI_t + pI_{ш} - pI_g + j \cdot \omega_k \cdot (I_t + I_{ш} - I_g) = 0 \quad (3)$$

Після підставлення складових отримуємо:

$$U_g = \frac{1}{Y} \cdot \left[ \frac{U_s}{L_t} + \frac{R_t}{L_t} I_t + \frac{R_{ш}}{L_{ш}} I_{ш} - \frac{R_s}{L_{\sigma s}} \cdot (1 - a_s) \cdot \gamma_g - \frac{E_r}{L_{\sigma s}} \right] \quad (4)$$

де  $E_r = \sum_{i=1}^2 a_r^i \cdot (p\psi_r^i + j \cdot \omega_k \cdot \psi_r^i)$  – еквівалентна

ЕРС двоконтурного ротора АГ;

$Y = \frac{1}{L_t} + \frac{1}{L_{ш}} + \frac{1 - a_s}{L_{\sigma s}}$  – власна інверсна індуктивність вузла.

Взаємозв'язок між параметрами вітру (середня швидкість, поривність), вітроколеса (число моду-

лів, кут розвороту лопатей) і моментом вітротурбіни є достатньо складною, але у дослідженні електромагнітних перехідних процесів з частотою затухання менше ніж 0,5 с величина  $M_T$  може бути прийнята постійною.

Якщо розглядати процеси в синхронному генераторі (далі – СГ) під час роботи з мережею, головне значення мають питання включення на паралельну роботу й регулювання його активної та реактивної потужності. Як правило, потужність мережі набагато більша потужності генератора, а напруга й частота мережі постійні.

Під час роботи СГ на мережу великої потужності його напруга залишається незмінною й рівною напрузі мережі, що обумовлює постійність результуючого магнітного потоку генератора. В разі збільшення струму збудження (перезбудження генератора) між мережею і статором СГ з'явиться вирівнювальний струм [3].

Стійка паралельна робота генератора з мережею підприємства можлива лише за наявності статизму по реактивній потужності. Статизм по реактивній потужності ( $S_Q$ ) визначається у відсотках від напруги холостого ходу  $U_0$ :

$$S_Q = \frac{U_0 - U_n}{U_0} \cdot 100\% \quad (5)$$

Система самозбудження забезпечує збільшення струму збудження генератора зі зростанням його навантаження. Оскільки за паралельної роботи СГ з мережею  $U_c = U_n$ , то в умовах відсутності статизму за збільшення потужності  $Q$  збільшуватиметься струм збудження. Це спричинить подальше зростання реактивної потужності, і процес продовжуватиметься до виходу генератора з ладу. Величина статизму по реактивній потужності повинна становити 3–4%.

Публічне акціонерне товариство «Полтавський ГЗК» (далі – ПАТ «Полтавський ГЗК») є дуже енергоємним підприємством, яке споживає тисячі ГВт електричної енергії щорічно, зі встановленою одиничною потужністю електроприймачів близько декількох МВт. Отже, розглядати класичний вибір потужності ВЕС в залежності від споживача нераціонально в цьому випадку.

Розрахуємо потужність повітряного потоку на відвалах Полтавського ГЗК за формулою:

$$P_n = 0,5 \cdot v^3 \cdot F \quad (6)$$

Беручи до уваги те, що середня швидкість вітру за рік по Полтавській області становить

4,1 м/с то можна вирахувати середню швидкість за рік на відвалах ПАТ «Полтавський ГЗК». Висота східного відвалу – 130 м, а західного – 152 м, з урахуванням висоти щогли 75 м отримаємо:

$$V_{cx} = 4,1 \cdot (178 / 10)^{0,2} = 7,29 \text{ м/с},$$

$$V_{zx} = 4,1 \cdot (200 / 10)^{0,2} = 7,46 \text{ м/с}.$$

Враховуючи те, що площа східного й західного відвалів – 5200 тис. м<sup>2</sup> та 7166 тис. м<sup>2</sup>, потужність повітряного потоку на відвалах становитиме:

$$P_{n,cx} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 7,29^3 \cdot 5200000 = 1234941550 \text{ Вт} = 1,23 \text{ ГВт},$$

$$P_{n,zx} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 7,46^3 \cdot 7166000 = 1823701522 \text{ Вт} = 1,82 \text{ ГВт}.$$

Враховуючи те, що робоча площа відвалу буде  $S_{роб} = \frac{3}{4} \cdot S = 5374500$  тис. м<sup>2</sup>, а з технічних міркувань, позаяк відвал робочий, то ВЕС зможуть зайняти не більше ніж половину цієї площі:

$$S_{роб.ВЕС} = \frac{1}{2} \cdot 5374500 = 2687250 \text{ тис. м}^2.$$

Знаючи площу, яка може бути використана для ВЕС, можемо розрахувати кількість установок, які можна розмістити. Знаючи, що в регіоні, де розташована метеостанція, переважний напрямок вітру, тому доцільно розміщати вітроенергетичні установки (далі – ВЕУ) рядами, перпендикулярними переважному напрямку вітру:

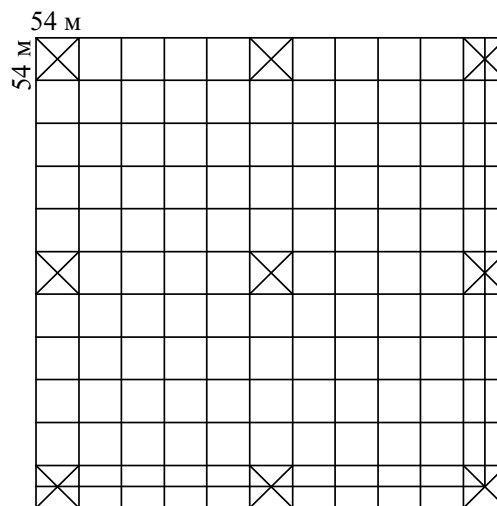


Рис. 2. Розрахункова схема розташування ВЕУ

Знаючи, що діаметр ротора вітротурбіни дорівнює 54 м, а відстань між сусідніми ВЕУ повинна бути не менше 4D, можемо розрахувати площу для 4 ВЕУ:

$$S_{4ВЕУ} = 54 \cdot 54 \cdot 100 = 291600 \text{ м}^2.$$

Звідки площа для однієї ВЕУ буде:

$$S_{1BEU} = \frac{291600}{4} = 72900 \text{ м}^2.$$

Знаючи загальну робочу площу відвалу й площу, яка необхідна для роботи однієї ВЕУ, розрахуємо скільки ВЕУ можна встановити на заданій площі:

$$n_{BEU} = \frac{S_{роб.ВЕС}}{S_{1BEU}} \quad (7)$$

$$n_{BEU} = \frac{2687250}{72900} = 37 \text{ шт.}$$

З техніко-економічних міркувань і для мінімізації втрат енергії підключення ВЕС планується до ГПП, яке розташовано найближче до місця розташування ВЕС. В моєму випадку це ГПП 4/1.

Оскільки планується під'єднання до силового трансформатора, для вибору потужності ВЕС необхідно враховувати коефіцієнти завантаження трансформаторів. Далі в таблиці представлено показники роботи трансформаторів.

Як бачимо з таблиці, коефіцієнти завантаження трансформаторів на ГПП 4/1 дуже малі, що обумовлено специфікою роботи підприємства. Тому для того щоб знати, наскільки ми можемо розвантажити трансформатори, необхідно розрахувати втрати до та після під'єднання ВЕС.

Застосувавши рівняння втрат активної та реактивної енергії в трансформаторі, знайдемо його повні втрати за рік з коефіцієнтом завантаження  $K_3=0,131$ :

$$\Delta P_T = \Delta P_{xx} \cdot T_z + \Delta P_{кз} \cdot k_3^2 \cdot \tau \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (8)$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{xx} \cdot T_z + \Delta Q_{кз} \cdot k_3^2 \cdot \tau \text{ кВАр} \cdot \text{год}, \quad (9)$$

$$\Delta S_T = \sqrt{\Delta P_T^2 + \Delta Q_T^2} \text{ кВА}, \quad (10)$$

де  $T_z$  – число годин роботи трансформатора за рік з коефіцієнтом завантаження  $K_3=0,131$ ,  $T_z = 5000$  год;  $\tau$  – час максимальних втрат: умовне число годин, упродовж яких максимальний струм, що протікає безперервно, створює втрати енергії, які дорівнюють дійсним втратам енергії за рік, год.

Розрахуємо втрати реактивної потужності на холостому ходу:

$$\Delta Q_{xx} = S_n \cdot \frac{I_{xx}}{100} \quad (11)$$

$$\Delta Q_{xx} = 16000 \cdot \frac{0,7}{100} = 112$$

$$\Delta Q_{кз} = S_n \cdot \frac{U_{кз}}{100} \quad (12)$$

$$\Delta Q_{кз} = 16000 \cdot \frac{10,5}{100} = 1680$$

$$\Delta P_T = 18 \cdot 5000 + 85 \cdot 0,131^2 \cdot 3000 = 95 \text{ МВт} \cdot \text{год}$$

$$\Delta Q_T = 112 \cdot 5000 + 1680 \cdot 0,131^2 \cdot 3000 = 647 \text{ кВАр} \cdot \text{год}$$

$$\Delta S_T = \sqrt{95^2 + 647^2} = 654 \text{ кВА}.$$

Що у відсотковому співвідношенні становитиме:

$$\Delta S_T = \frac{654}{18365} \cdot 100 = 3,6 \text{ \%}.$$

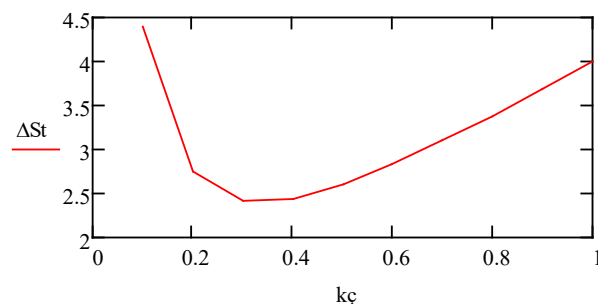


Рис. 3. Залежність втрат потужності від коефіцієнта завантаження трансформатора ТДН 16000/110

Оскільки потужність трансформатора з коефіцієнтом завантаження 0,131 становить близько 2 МВт·год, а трансформатори встановлювалися на перспективу розвитку підприємства, то під час вибору потужності ВЕС орієнтуватися на втрати в трансформаторі недоцільно.

**Висновки.** На гірничорудних підприємствах актуальним і можливим є впровадження в загальну структуру систем електроживлення вітроенергетичних станцій. Водночас з метою достатньо енергоефективного використання систем електроживлення необхідно ґрунтовно аналізувати питання, пов'язані з режимами роботи енергетичного обладнання на етапі їх проектування.

У статті розглянуто теоретичні засади підходу до проектування вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств.

#### Список літератури:

1. Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізничних підприємств (аналіз, перспективи, проекти): монографія / О.М. Сінчук та ін. Кривий Ріг : Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.



2. Кузнєцов М.П. Методи оцінки випадкових параметрів роботи енергосистем з інтегрованими вітровими електростанціями / М.П.Кузнєцов. *Відновлювана енергетика*. 2014. № 1. С. 59–64.
3. Buchholz B., Styczynski Z. *Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Springer, 2014. 396 p.
4. Charytoniuk W., Chen M.S. Short-term Forecasting in Power Systems Using a General Regression Neural Network. *IEEE Trans. on Power Systems*. 1995. Vol. 7. № 1.
5. Пекур П.П. Стохастичне моделювання динаміки повітряного потоку в приземному шарі атмосфери за довільної функції розподілу швидкості вітру / П.П. Пекур. *Відновлювана енергетика*. 2005. № 3–4. С. 29–33.
6. Площадки для вітрових електростанцій. Метеорологічні дослідження характеристик вітру : ГКД 341.003.003.006:2000. Офіц. вид. Київ : Мін-во палива та енергетики України, 2001. 30 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
7. Полищук С.В. Исследование корреляционной взаимосвязи нагрузок энергосистем и стохастически периодических метеофакторов / С.В. Полищук, Н.В. Приймак. *Техническая электродинамика*. 1991. № 1. С. 98–103.
8. Morales D.S. Maximum Power Point tracking algorithms for photovoltaic applications. Thesis for obtaining the degree of Master of science in technology / D.S. Morales. Espoo, Finland : Aalto University, Faculty of electronics, communications and automation, 2010. 82 p.

#### **Sinchuk O.M., Boiko S.M., Nekrasov A.V., Noznova M.O., Fed M.M. ON THE DESIGN OF WIND POWER PLANTS IN THE CONDITIONS OF MINING ENTERPRISES**

*The purpose of this work is the theoretical basis for the design of wind power plants in the conditions of mining enterprises. Decentralized grid systems using renewable energy sources, based on renewable energy sources, can be an extremely profitable area for investment, if it is possible to locate energy sources near consumers. Existing methods for designing the power supply system for remote consumers are generally considered as an alternative to centralized power supply, electricity supply through generation of electricity based on sources of distributed generation, including wind power stations. At mining enterprises, it is relevant and possible to introduce wind power systems into the overall structure of power systems. At the same time, in order to use energy structures in a sufficiently energy-efficient way, it is necessary to thoroughly analyze the issues related to the modes of operation of power equipment at the design stage. So, as power transformers with a load factor of 0.131, and they were installed on the prospect of enterprise development, when choosing the capacity of wind power stations, at the stage of their connection to the network, it is not advisable to focus on losses in the transformer. Given the fact that iron ore enterprises are in the class of energy-intensive, and the world is constantly competing for markets for iron ore raw materials, because iron ore industry is an important place in the economy of many countries in the world, can be considered as a relevant scientific and practical problem for the development of models and theorems methods for the introduction of wind power stations in the structure of the complex of electricity supply and consumption of mining enterprises. The theoretical principles of the approach to the design of wind power stations in the conditions of mining enterprises are considered in the article.*

**Key words:** wind power station, power equipment, power supply to mining enterprises, design of power supply system.

**Черноусенко О.Ю.**

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

**Бутовський Л.С.**

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

**Грановська О.О.**

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

**Мороз О.С.**

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

**Старченко О.С.**

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

## ПУСКОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБІЛІЗАТОРНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ ПРИ ПОДАЧІ ГАЗОВОГО ПАЛИВА В ЗОНУ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ

*У статті наведено результати експериментальних досліджень щодо характеристик запалювання факела в мікродифузійних пальниках, які складаються з системи погано обтічних тіл – стабілізаторів, між якими протікає повітряний потік. Паливо на горіння подається в зону рециркуляції через систему отворів, які є у вихідній торцевій стінці стабілізатора вздовж його висоти. В експериментах запалювання факела здійснюється від авіаційної свічки з кільцевим поверхневим розрядним проміжком. Електрична свічка була розташована з торця одного зі стабілізаторів. У результаті проведення досліджень встановлено оптимальне місце розташування кільцевого розрядного проміжку свічки, за якого отримано надійне запалювання за мінімальної швидкості газових струменів, тобто мінімальної витрати палива, чому відповідає максимальний коефіцієнт надлишку повітря в пальнику. Отримано дані щодо впливу на характеристики запалювання факела таких параметрів, як ширина стабілізатора, діаметр газоподавальних отворів, коефіцієнт затінення пальника, швидкість повітряного потоку, температура повітря. Встановлено, що коефіцієнт надлишку повітря під час запалювання підвищується за збільшення ширини стабілізатора, діаметра газового отвору й температури повітря та зменшується за підвищення швидкості повітряного потоку, коефіцієнта затінення пальника. Експерименти показали, що підвищення інтенсивності турбулентності повітряного потоку негативно впливає на характеристики запалювання факелу й робить неможливим виконання надійних розрахунків характеристик запалювання.*

*Наведені експериментальні дані щодо характеристик запалювання факела від свічки поверхневого розряду й отримана експериментальна залежність дають змогу виконувати попередній розрахунок характеристик мікродифузійних стабілізаторних пальникових пристроїв з подачею газу в зону рециркуляції.*

**Ключові слова:** стабілізаторний пальник, дифузійне горіння, запалювання факела, зона рециркуляції, швидкість повітря, температура.

**Постановка проблеми.** Газоподібне паливо, зокрема природний газ, широко використовується в багатьох галузях промисловості. Воно йде на потреби хімічної промисловості, використовується в об'єктах житлово-комунальної сфери, при виробництві сталі,

чавуну, цементу тощо. Значна частина природного газу спалюється в енергетичних і промислових котлах, печах, сушилах, підігрівачах різних типів.

Господарство України значною мірою залежить від імпорту цього коштовного продукту.

Так, у 2016 р. в Україні було спожито близько 32,3 млрд м<sup>3</sup> газу, а видобуто – 19,9 млрд м<sup>3</sup> [1, с. 92]. Найближчим часом використання газоподібного палива в енергетиці та промисловості України й світу буде продовжено. Підтвердженням тому є будівництво в європейських державах «Північного потоку-2» та «Південного потоку».

Тому одне з актуальних завдань під час використання коштовного природного газу, зокрема як палива, полягає в розробленні заходів щодо впровадження енергоефективних технологій спалювання за найбільш оптимальних схем організації топкового процесу.

Економічні й екологічні показники установки, у якій використовується природний газ як паливо, значною мірою визначаються характеристиками пального пристрою. Серед основних характеристик – висока повнота згоряння, низький вміст токсичних оксидів азоту, невеликий гідравлічний опір тощо. Однією з основних вимог є ефективна й надійна робота в широкому діапазоні режимів.

Так, відповідно до ГОСТу 21204-87 [2, с. 2] коефіцієнт робочого регулювання промислових пальників повинен бути  $K_{pp} = 5$  ( $K_{pp} = N_{ном} / N_{min}$ , де  $N_{ном}$ ,  $N_{min}$  – номінальна й мінімальна теплова потужність пальника). Водночас умови реальної експлуатації пальників вимагають значно ширшого діапазону запалювання факела й сталої роботи. Наприклад, коефіцієнт надлишку повітря в газотурбінній установці  $\alpha = 2 \div 3$ , а на режимі пуску  $\alpha \approx 30$  [3, с. 4]; сушіння обмурівки стаціонарного парового котла для запобігання «термічного» удару відповідно до вимог РД 34.26.201 [4, с. 2] починається з температури  $t_c = 150^\circ\text{C}$ , що відповідає коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha \approx 20$ ; підігрівання газів у блоці допалювальних пристроїв, які встановлюються перед котлом-утилізатором парогазової установки, відбувається за температури  $80 \div 210^\circ\text{C}$  [5, с. 155].

Таким чином, актуальність роботи обумовлена потребою в розробленні пального пристроїв широкого призначення, які забезпечують ефективну роботу у визначеному діапазоні режимів, а також надійне запалювання факела й стабілізацію горіння в широкому діапазоні навантажень пального.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В енергетиці та промисловості для організації робочого процесу спалювання палива традиційно використовуються реєстрові пального пристрої з подачею газових струменів у потік повітря, який закручується за допомогою лопаток-реєстрів, що повернуті під певним кутом до направлення

повітряного потоку. Закрутка повітряного потоку реєстром забезпечує високо інтенсивний процес сумішоутворення палива з повітрям, що дає змогу отримати відносно коротку довжину факела і високу теплову напругу топкового об'єму. До недоліків реєстрових пального пристроїв можна віднести значний гідравлічний опір, а також високу чутливість повноти згоряння до зміни коефіцієнта надлишку повітря. Так, за відхилення складу суміші від оптимального повнота згоряння різко погіршується, а за  $\alpha > 2,0$  (для метану) горіння стає неможливим [6, с. 512].

У випадках, коли палик за умовами експлуатації повинен працювати зі змінним  $\alpha$  (камери згоряння газотурбінних установок, топки сушильних агрегатів тощо), необхідно встановлювати черговий палик, що ускладнює конструкцію основного пального й регулювання процесу горіння.

Однією зі схем організації процесу горіння під час роботи зі змінним коефіцієнтом надлишку повітря в широкому діапазоні режимів є спалювання газу в системі погано обтічних тіл – стабілізаторів з різними схемами подачі газу й повітря. Такий метод спалювання реалізується за розроблення камер згоряння газотурбінних установок [7, с. 28], у прямокутних камерах згоряння повітряно-реактивних двигунів [8, с. 9; 9, с. 11; 10, с. 592], форсажних камерах згоряння [11, с. 341; 12, с. 36; 13, с. 217],

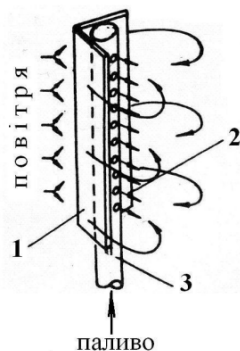
За однією зі схем пального пристроїв газове паливо подається в зону рециркуляції за стабілізаторами, що оббігаються повітряним потоком. Такий підхід використовується, наприклад, в камерах згоряння проміжного підігріву газів [14, с. 84; 15, с. 54; 16, с. 108; 17, с. 10], за розроблення когенераційно-утилізаційних технологій на базі газотурбінних установок (ГТУ) [18, с. 86; 5, с. 158].

У дифузійно-стабілізаторних пального паливо подається в зону рециркуляції розподілено вздовж висоти стабілізатора з колектора (рис. 1) [14, с. 84] або з самого стабілізатора, якщо він порожнистий.

Процес горіння відбувається в умовах багатоструменевого сумішоутворення з накладанням на факел поля інтенсивної турбулентності, що генерується рециркуляційною зоною за погано обтічним тілом – стабілізатором.

Проведені дослідження показали, що завдяки високому рівню турбулентності в зоні зворотних потоків відбувається інтенсивне перемішування палива з повітрям. Газ розсіюється по всьому об'єму зони, утворюючи суміш, яка горить в

режимі, що є близьким до режиму горіння попередньо перемішаних сумішей. Але інтенсивність сумішоутворення є недостатньою, склад суміші відрізняється від гомогенного складу. Тому пальникові пристрої такого типу належать до проміжної групи, яка має загальні риси кінетичних і дифузійних пальників, а характеристики робочого процесу визначаються кінетичними та дифузійними параметрами, зокрема сталість горіння забезпечується за  $\alpha > 2,0$  (для метану).



**Рис. 1.** Схема пальникового пристрою з розподіленою подачею газу в слід за стабілізатором: 1 – стабілізатор; 2 – газіві струмені; 3- газовий колектор

Як відомо, процес горіння суміші палива й окислювача може бути реалізований, перш за все, за умови, коли в пальнику є зони, де суміш перебуває в концентраційних межах розповсюдження полум'я, швидкість потоку менше швидкості розповсюдження полум'я, а теплова потужність запального джерела є достатньою для ініціації хімічної реакції горіння – забезпечення необхідної енергії активації [13, с. 69].

В паливоспалювальних пристроях завжди використовується примусове запалювання горючої суміші, температура якої, як правило, значно менша від температури горіння. У цьому випадку від стороннього джерела запалюється невелика частка від загального об'єму суміші.

Запалювання факела в пальникових пристроях можна виконувати з використанням пілотного факела, розжареного тіла, електричної свічки, кільцевого факельного стабілізатора тощо [8, с. 262]. Завдяки зручності та високій надійності в стабілізаторних пальниках часто використовується електроіскрове запалювання факела [13, с. 226; 19, с. 380].

Електричну іскру, яка утворюється між електродами, можна розглядати як невелике розжарене тіло, температура якого доходить до 6000–20000 К [13, с. 47]. Чим вище температура й розміри іскро-

вого проміжку, тим ефективніше відбувається процес запалювання. Крім того, електричний розряд викликає іонізацію довколишнього середовища з утворенням великої кількості вільних атомів і радикалів, що поліпшує запалювання й підвищує швидкість реакції горіння.

Оглядовий матеріал щодо вимушеного запалювання потоку газоповітряної суміші від електричного розряду наведено в [10, с. 463, 469]. Під час іскрового запалювання є мінімальна потужність розряду, який потрібен для початку реакції, причому ця потужність залежить як від параметрів суміші (концентрації пального й окисника, густини, температури суміші, коефіцієнта надлишку повітря), так і від швидкості й турбулентності потоку суміші.

Загальна теплова енергія розряду, яка потрібна для запалювання суміші, що рухається, дорівнює [10, с. 474, 469]:

$$Q = Q_0 + A \cdot u^{1.5}, \quad (1)$$

$$Q_0 \sim \frac{\lambda_e^3 T_n^2 (T_e - T_n)}{u_n^3 \rho_n^2 C_p}, \quad (2)$$

де  $Q_0$  – енергія запалювання нерухомої суміші,  $A$  – досвідний коефіцієнт,  $u$  – швидкість потоку,  $u_n$  – нормальна швидкість розповсюдження полум'я,  $T_n$ ,  $\rho_n$ ,  $C_p$  – температура, густина й теплоємність свіжої суміші,  $T_e$  – температура горіння,  $\lambda_e$  – коефіцієнт теплопровідності продуктів горіння.

З наведених даних видно, що необхідна для запалювання потоку суміші енергія іскри збільшується з підвищенням швидкості повітряного потоку й потрібного підігрівання суміші до температури займання.

Водночас огляд моделей запалювання свідчить, що наведені залежності є якісними характеристиками й за ними неможливо виконувати попередній розрахунок робочих параметрів під час іскрового запалювання факела в пальниковому пристрої, тому перевага надається експериментальним дослідженням.

З точки зору практичного використання системи запалювання доцільно після одноразового запалювання суміші палива й повітря забезпечити безперервне запалювання горючої суміші, що надходить в пальник.

В дифузійно-стабілізаторних пальниках цей процес організовано завдяки використанню зони рециркуляції, що утворюється за стабілізатором.

Наявні моделі запалювання факела й стабілізації горіння під час спалювання попередньо



перемішаних сумішей й експериментальні дані розглянуто в роботах [8, с. 269; 9, с. 392; 10, с. 559; 11, с. 162]. В наведених роботах вказується, що теорія запалювання факела й стабілізації горіння з використанням зони рециркуляції розроблена недостатньо, а також що відсутня однакова система поглядів на механізм стабілізації.

Серед найбільш поширених напівемпіричних теорій запалювання паливо-повітряної суміші можна розглянути теплову теорію, що наведена, наприклад, в [9, с. 392].

За цією моделлю кількість тепла, яка необхідна для запалювання свіжої суміші дорівнює:

$$q_1 \sim w [\delta_i (\rho \cdot C_p) (T_i - T_0)], \quad (3)$$

де  $w$  – швидкість потоку,  $\delta_i$  – товщина зони підготовки суміші;  $(T_i - T_0)$  – різниця між температурою запалювання і температурою потоку;  $\rho$  – густина суміші,  $C_p$  – теплоємність суміші.

Якщо прийняти

$$\delta_i \sim \frac{a}{u_n}, \quad (4)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $u_n$  – нормальна швидкість розповсюдження полум'я,

враховуючи, що

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho}, \quad (5)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності суміші, то

$$q_1 \sim w \frac{\lambda}{u_n} (T_i - T_0). \quad (6)$$

Кількість тепла, що передається із зони рециркуляції холодній суміші,

$$q_2 \sim \left\{ Re^c \frac{\lambda}{d} \right\} d (T_{n.3} - T_0) = \left\{ \left( \frac{dw}{v} \right)^c \frac{\lambda}{d} \right\} d (T_{n.3} - T_0), \quad (7)$$

де  $(T_{n.3} - T_0)$  – різниця температури продуктів згорання та свіжої суміші;  $d$  – характерний розмір стабілізатора;  $v$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості суміші;  $c$  – експериментальна величина.

Процес горіння є стабільним, якщо  $q_1 > q_2$ , критичні умови настають за  $q_2 = q_1$ .

Після відповідних перетворень пропонується така залежність:

$$\frac{w_{зан}}{d^a} \sim \frac{1}{v^a} \left\{ \frac{u_n (T_{n.3} - T_0)}{(T_i - T_0)} \right\}^{1+a}, \quad (8)$$

де

$$a = \frac{1}{1-C}.$$

Рівняння (8) враховує вплив розміру стабілізатора, тиску в пальнику (через  $v$ ) і початкової температури суміші. Водночас не враховується зміна температури газів у зоні рециркуляції.

Під час розгляду питання сталості горіння за стабілізатором полум'я неоднорідних сумішей [20, с. 361] встановлена можливість використання для визначення меж сталого горіння залежності вигляду:

$$\frac{W_{ш}}{p^m \cdot d^n} = \varphi(\alpha, T_0, c_k), \quad (9)$$

де  $d$  – характерний розмір стабілізатора;  $\varphi(\alpha, T_0, c_k)$  – швидкість хімічної реакції за температури газу  $T_{ш}$  в циркуляційній зоні за стабілізатором ( $T_{ш} \approx 0,95 T_r$ );  $c_k$  – концентрація кисню в суміші;  $T_r$  – температура горіння;  $W_{ш}$  – швидкість суміші між стабілізаторами.

У граничні умови сталості горіння за стабілізатором під час подачі газу в зону рециркуляції з торця стабілізатора в роботі [21, с. 293] введені параметри, що використовуються для оброблення даних для дифузійних факелів:

$$\frac{W_{ш}}{B_{ст}} = f\left(\frac{B_{ст}^{1,75}}{d_r \cdot W_{ш}^{0,4} \cdot W_{rmin}^{0,54}}\right). \quad (10)$$

Таким чином, аналіз літературних даних [8–11] показує, що під час спалювання палива в повітрі за різними схемами сумішеутворення умови запалювання й стабілізації полум'я залежать практично від одних і тих самих параметрів. Різниця спостерігається тільки в значеннях емпіричних коефіцієнтів, що входять у відповідні формули. Під час подавання газу в зону рециркуляції за стабілізатором стабільність горіння залежить від режимних чинників – швидкості повітряного потоку,  $W_k$ ; температури повітря,  $T_n$ , а також конструктивних факторів – розміру стабілізатора  $B_{ст}$ , площі вихідного торця стабілізатора,  $F_{ст}$ , коефіцієнта затінення пальникового пристрою  $K_f$  ( $K_f = B_{ст} / t_{ст}$ ,  $t_{ст}$  – крок стабілізаторів в пальнику). В групу таких факторів можуть входити також параметри, які визначають структуру розподілення палива в зоні рециркуляції: діаметр газового отвору  $d_r$ , сумарна площа газових отворів у стабілізаторі  $F_r$ ; швидкість виходу газу з отворів  $W_r$ .

**Постановка завдання.** Метою досліджень було експериментальне дослідження особливостей

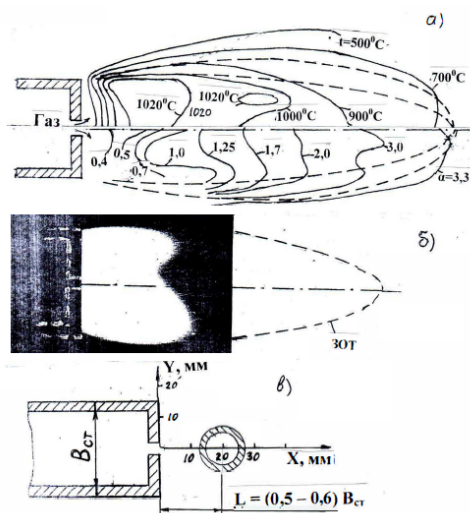
пускових характеристик паликових пристроїв стабілізаторного типу за струменевої подачі палива в зону рециркуляції з газоподавальних отворів, що розташовані у вихідній торцевій стінці стабілізатора й розподілені вздовж його висоти.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В роботі досліджувалися пускові характеристики палиників з такими геометричними параметрами: висота стабілізатора  $H_{\text{ст}} = 100$  мм; ширина стабілізатора  $B_{\text{ст}} = 15,5$  мм; 30 мм; 60 мм; коефіцієнт затінення паликового пристрою  $K_f = 0,15$ ; 0,30; 0,45; 0,60; діаметр газоподавальних отворів  $d_r = 2,1 \div 5,0$  мм; відносний крок розташування газових отворів  $t_r / d_r = 1,8 \div 7,7$ , де  $t_r$  – відстань між газовими отворами. Залежно від кількості газових отворів вони могли розташовуватись у декілька рядів. Розміри корпусу палиника в перерізі в місці встановлення стабілізаторів становили 100 мм  $\times$  200 мм.

В експериментах швидкість і температура повітряного потоку в корпусі палиника перед стабілізаторами змінювалась у діапазоні  $W_k = 10 \div 100$  м/с;  $t_n = 50 \div 80^\circ\text{C}$ ;  $350^\circ\text{C}$ ;  $800^\circ\text{C}$ .

Під час проведення досліджень щодо запалювання факела використовувалася свічка поверхневого розряду типу СПЕ-04-А й котушка запалювання КР-1 з живленням постійним током напругою 24 В.

Схема плоского порожнистого стабілізатора, а також подачі газу на горіння й розміщення кільцевого розрядного проміжку свічки наведено на рис. 2.

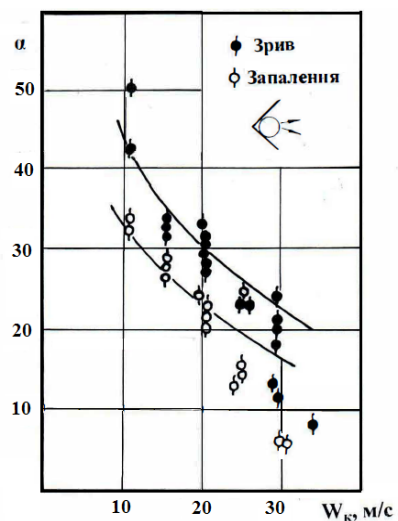


**Рис. 2.** Поля температур газів ( $t$ ) і місцевого коефіцієнта надлишку повітря ( $\alpha$ ) за стабілізатором під час подачі газу в зону рециркуляції (а), вид факела на режимі запалювання (б) і схема розміщення кільцевого розрядного проміжку свічки (в)

У виборі місця розташування свічки враховувалися поля концентрацій і температур за стабілізатором під час подачі газу в зону рециркуляції. Як видно з рис. 2, а, під час подавання палива в зону рециркуляції відмічається нерівномірність концентрації палива й температури газів у зоні рециркуляції, причому значення місцевих коефіцієнтів надлишку повітря, які відповідають концентраційним межах горіння метану ( $0,6 < \alpha < 2,0$ ), а також максимальні значення температури газів спостерігаються вздовж осової лінії зони зворотних токів поблизу стабілізатора. Завдяки цьому на режимах зі зменшеною витратою палива факел може займати тільки частину зони рециркуляції (рис. 2, б). У зв'язку з цим іскровий проміжок свічки розташовувався вздовж осі сліду за стабілізатором на відстані  $L = (0,5 - 0,6) \cdot B_{\text{ст}}$  (рис. 2, в).

Як показали випробування, за такого розташування свічки спостерігається найменша витрата газу, що необхідна для запалювання факела.

На рис. 3 наведено порівняльні дані щодо запалювання факела й бідного зриву залежно від швидкості повітряного потоку, що обтікає стабілізатор. У зв'язку з тим, що для ініціювання реакції горіння необхідно підвести до системи додаткову енергію активації, запалювання факела завжди відбувається за витрат палива приблизно на 20–30 % більше, ніж бідний зрив.



**Рис. 3.** Порівняння даних щодо запалювання й бідного зриву факела за стабілізаторами

Як видно з рис. 3, значення загального коефіцієнта надлишку повітря в палинику під час запалювання факела  $\alpha_{\text{зап}}$  значно більше одиниці й виходить за концентраційні межі горіння. Це пов'язано з тим, що паливо виходить з газоподавальних отворів з порівняно невеликою

швидкістю й відповідно газові струмені мають обмежену далекобійність. У такому випадку в процесі сумішоутворення бере участь не все повітря, що обтікає стабілізатор, а тільки та його частина, що протікає в граничному шарі біля бокової поверхні стабілізатора. Як результат місцеві коефіцієнти надлишку повітря (рис. 2, а) значно менші, ніж загальний коефіцієнт надлишку повітря в пальнику.

Результати експериментальних даних щодо залежності характеристики запалювання факела від швидкості повітряного потоку й ширини стабілізатора за незмінного коефіцієнта затінення наведено на рис. 4.

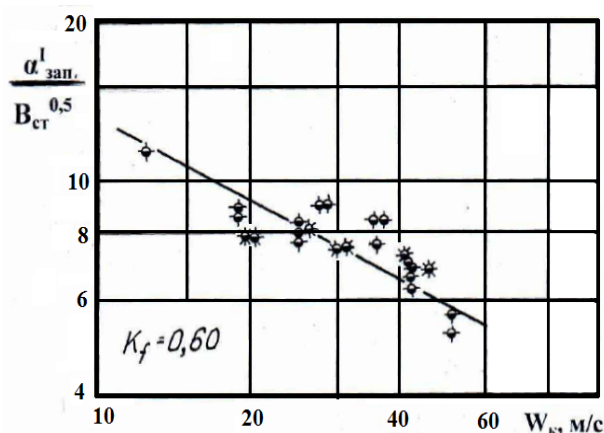


Рис. 4. Вплив на характеристики запалювання факела ширини стабілізатора  $B_{ст}$  і швидкості повітряного потоку  $W_k$

Було встановлено, що під час запалювання (як і у випадку бідного зриву) факела можна використовувати залежність, отриману після оброблення результатів досліджень сталості горіння гомогенних сумішей виду:

$$\alpha_{зап} = const \cdot \frac{B_{ст}^n}{W_k^m} \quad (11)$$

На рис. 5 представлено результати експериментальних досліджень щодо запалювання факела за різних коефіцієнтів затінення пальника, де за відносну температуру повітря прийнято  $\bar{T}_n = T_n / 273$ .

Як витікає з наведених даних, за  $B_{ст} = const$  і  $W_k = const$ , а також збільшення коефіцієнта затінення  $K_f$  характеристики запалювання факела погіршуються. Це пов'язано з тим, що через збільшення  $K_f$  (зменшення відстані між стабілізаторами) підвищується швидкість повітря між стабілізаторами й витрата його в зону рециркуляції, що спричинює підвищення коефіцієнта надлишку повітря в зоні  $\alpha_{рец} \sim K_f \cdot (1 + K_f)$  [22, с. 6].

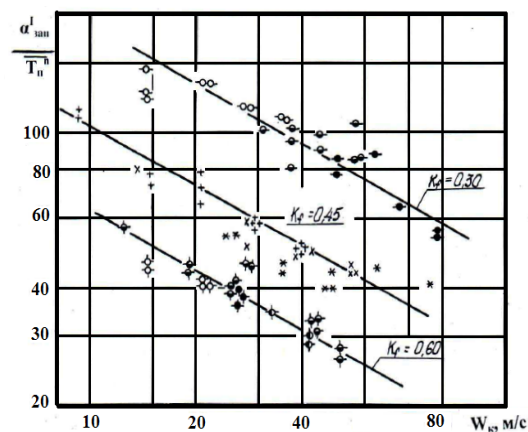


Рис. 5. Характеристики запалювання факела за різних коефіцієнтів затінення пальникового пристрою  $K_f$

На рис. 6 наведено дані щодо запалювання факела за різної температури повітряного потоку.

Як показали дослідження в діапазоні температур повітря  $t_n = 70 \div 800^\circ\text{C}$ , характеристики запалювання зі зростанням  $t_n$  поліпшуються, тобто коефіцієнт надлишку повітря під час запалювання  $\alpha_{зап}$  збільшується. Це пов'язано з тим, що за підвищення температури повітря збільшується нормальна й турбулентна швидкості полум'я, розширюються межі сталого горіння суміші, зменшуються величина енергії активації, яка необхідна для ініціювання реакції горіння, та кількість теплоти зони рециркуляції, що йде на підігрів суміші до температури запалювання. Також скорочується період затримки запалювання.

Водночас з рис. 6 видно, що зі збільшенням  $K_f$  від 0,3 до 0,6 ступінь впливу  $t_n$  на зниження  $\alpha_{зап}$  зменшується.

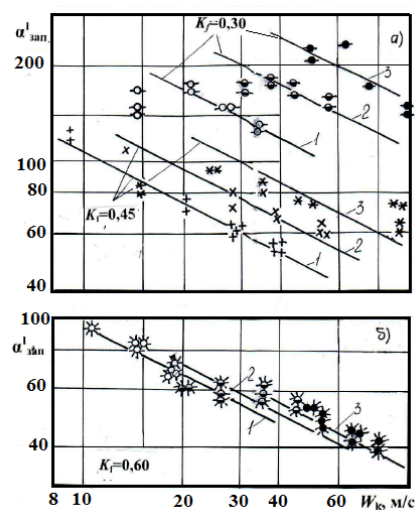


Рис. 6. Характеристики запалювання факела за різної температури повітряного потоку  $t_n$  і коефіцієнта затінення  $K_f$

Це пов'язано з тим, що в разі незмінної витрати повітря  $G_{\text{п}} = \text{const}$  і  $W_{\text{к}} = \text{const}$  за збільшення коефіцієнта затінення  $K_f$  підвищується швидкість повітря між стабілізаторами й відповідно інтенсивність масообмінних процесів у зоні рециркуляції, а також витрата теплоти зони зворотних потоків на підігрів свіжої суміші до температури запалювання факела.

Вплив температури повітряного потоку на характеристики запалювання факела за різних коефіцієнтів затінення можна представити у вигляді  $\alpha_{\text{зап}} \sim (T_{\text{п}} / 273)^p$ , де показник ступеня  $p = (1,3 - 2 \cdot K_f)$ .

В результаті аналізу експериментальних даних щодо впливу режимних і конструктивних факторів на характеристики запалювання факела від свічки поверхневого розряду в досліджених стабілізаторних пальникових пристроях з подачею газу в зону рециркуляції встановлена залежність виду

$$\alpha_{\text{зап}}^I = K_{\text{зап}} \frac{B_{\text{см}}^m}{W_{\text{к}}^n \cdot d_{\text{с}} \cdot K_f (1 + K_f)} \left( \frac{T_{\text{п}}}{273} \right)^{1,3-2K_f}. \quad (12)$$

Під час оброблення дослідних даних розмірність параметрів є такою:  $W_{\text{к}}$ , м/с;  $B_{\text{см}}$ , мм;  $d_{\text{с}}$ , мм;  $T_{\text{п}}$ , К,  $m = n = 0,5$ .

Як встановлено, для систем стабілізаторів за інтенсивності турбулентності повітряного потоку  $\varepsilon = 1,5\%$  дослідний коефіцієнт  $K_{\text{зап}} = 117$ .

Отримані експериментальні дані для випробуваних систем стабілізаторів представлені на рис. 7 у вигляді залежності параметра запалювання  $\Pi_{\text{зап}}$  від швидкості повітряного потоку:

$$\Pi_{\text{зап}} = \frac{\alpha_{\text{зап}}^I d_{\text{с}} K_f (1 + K_f)}{B_{\text{см}}^m (\bar{T}_{\text{п}})^n}. \quad (13)$$

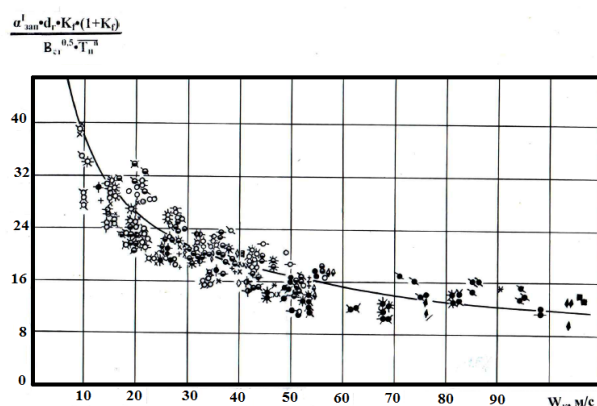


Рис. 7. Залежність параметра запалювання  $\Pi_{\text{зап}}$  для досліджених варіантів стабілізаторних пальникових пристроїв з подачею газу в зону рециркуляції від швидкості повітряного потоку перед пристроєм

Проведені дослідження виявили вплив на характеристики запалювання факела турбулентності повітряного потоку.

Встановлено, що в разі підвищення інтенсивності турбулентності повітряного потоку  $\varepsilon$  перед пальниковим пристроєм характеристики запалювання факела погіршуються та за  $\varepsilon = 6\%$  значення  $(K_{\text{зап}})_{6\%} = (0,4 \div 0,6) \cdot (K_{\text{зап}})_{1,5\%}$  і можна прийняти, що за  $\varepsilon = 6\%$  у формулі (12)  $K_{\text{зап}} = 55$ .

Також встановлено, що за  $\varepsilon = 6\%$  для стабілізаторів шириною  $B_{\text{ст}} \leq 30$  мм в разі збільшення швидкості повітряного потоку  $Re > 1 \cdot 10^4$  (де  $Re = W_{\text{п}} \cdot B_{\text{ст}} / \nu_{\text{п}}$ ) значення показника ступеня  $m$  за швидкості повітря значно збільшується ( $m \gg 0,5$ ) і закономірності запалювання факела достовірно встановити практично неможливо в зв'язку з великим розкиданням експериментальних даних. Таким чином, у випадку розвиненої турбулентності повітря запалення факела в системі стабілізаторів необхідно виконувати за зменшеної швидкості повітряного потоку. В разі зміни потужності іскрового запальника змінюються кількісні границі запалювання, але водночас можуть також бути використані дані щодо впливу конструктивних і режимних факторів на характеристики запалювання факела в стабілізаторних пальникових пристроях [13, с. 47].

**Висновки.** В результаті проведення експериментальних досліджень щодо визначення характеристик запалювання факела в стабілізаторних пальникових пристроях з подачею газу в зону рециркуляції встановлено, що коефіцієнт надлишку повітря під час запалювання підвищується за збільшення ширини стабілізатора й температури повітряного потоку, зменшення швидкості повітря й коефіцієнта затінення пальника. Слід узяти до уваги, що за незмінних розмірів корпусу пальника збільшення розміру стабілізатора призводить до збільшення коефіцієнта надлишку повітря під час запалювання, але одночасно з цим збільшується коефіцієнт затінення пальника, що спричинює погіршення характеристик запалювання. В роботі запропоновано узагальнюючу залежність пускових характеристик пальників від геометричних і режимних параметрів системи. Встановлено значний вплив на характеристики запалювання факела інтенсивності турбулентності повітряного потоку. Для надійного запалювання факела рекомендовано зменшувати швидкість повітряного потоку в пальнику. Результати роботи щодо впливу конструктивних і режимних факторів на характеристики запалювання факела в стабілізаторних пальникових пристроях можуть бути використані для інших конструкцій іскрових запальників.



## Список літератури:

1. Каверцев В.Л. Обзор проблем эффективного использования топливно-энергетических ресурсов в промышленном секторе Украины та можливості оптимального їх використання / В.Л. Каверцев, В.О. Дягілев. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». 2017. № 10 (1232). С. 92–96.
2. ГОСТ 21204-83. Горелки газовые промышленные. Классификация. Общие технические требования, маркировка. Москва : Изд-во стандартов, 1986. 11 с.
3. Христин В.А., Любчик Г.Н. Газогорелочные устройства для сжигания газа при высоких и переменных избытках воздуха : *Научно-технический обзор*. Серія «Использование газа в народном хозяйстве». Вып. 10. Москва : ВНИИ Эгазпром, 1978. 60 с.
4. РД 34.26.201. Временная инструкция по сушке обмуровок стационарных котлов ТЭС. Москва : СПО Союзтехэнерго, 1980. 6 с.
5. Постникова А.М. Принципы конструирования блока дожигающих устройств для высокоэффективной парогазовой установки на базе двигателя НК-37 / А.М. Постников и др. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2007. № 2. С. 155–160.
6. Христин В.А. Влияние дежурной горелки на устойчивость и полноту горения факела / В.А. Христин, Ю.Н. Башкатов. *Теория и практика сжигания газа*. Вып. II. Ленинград : Недра, 1964. С. 510–516.
7. Сударев А.В., Маев В.А. Камеры сгорания газотурбинных установок. Интенсификация горения. Ленинград : Недра, 1990. 274 с.
8. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. Москва : Машиностроение, 1964. 306 с.
9. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах и др. Москва : Машиностроение, 1964. 526 с.
10. Щетинков Е.С. Физика горения газов. Москва : Наука, 1965. 739 с.
11. Основы проектирования и характеристики газотурбинных двигателей / под ред. У.Р. Хауторна, У.Т. Олсона. Москва : Машиностроение, 1961. 648 с.
12. Чигрин В.С. Конструкция форсажных камер и выходных устройств авиационных ГТД / В.С. Чигрин, С.Е. Белова. Рыбинск : РГАТА, 2004. 38 с.
13. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Москва : Машиностроение, 1984. 280 с.
14. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. Москва : Изд-во МЭИ, 2002. 584 с.
15. Горелочное устройство для котла-утилизатора ПГУ-800 / А.Д. Горбатенко и др. *Теплоэнергетика*. 1989. № 5. С. 54–58.
16. Шатиль А.А. Расчетное исследование топочных устройств. Санкт-Петербург : НПО ЦКТИ, 2003. 150 с.
17. Хоменок Л.А. Создание горелочных устройств камер дожига котлов-утилизаторов ПГУ-ТЭЦ. *Теплоэнергетика*, 2007. С. 10–16.
18. Когенерационно-утилизационные технологии на базе газотурбинных установок / Г.Н. Любчик и др. Киев : Варта, 2008. 188 с.
19. Meherwan P. Boyce. Gas Turbine Engineering Handbook. Gulf Professional Publishing, USA, 2002. 816 p.
20. Лебедев Б.П. О стабилизации пламени неоднородных смесей / Б.П. Лебедев, И.Ю. Доктор. *Горение и взрыв* : материалы третьего всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. 5–10 июля 1971 г. Москва : Наука, 1972. С. 361–365.
21. Христин В.А. Некоторые особенности развития и горения газовой струи в циркуляционной зоне за стабилизатором / В.А. Христин, Г.Н. Любчик. *Теория и практика сжигания газа*. Вып. III. Ленинград : Недра, 1967. С. 283–295.
22. Бутовский Л.С. Влияние режимных и конструктивных факторов на диффузионное сжигание газа за стабилизаторами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.04.01 «Парогенераторостроение, гидротурбостроение и парогазотурбостроение» ; Киевский политехнический институт. Киев, 1983. 16 с.

**Chernousenko O.Yu., Butovsky L.S., Hranovska O.O., Moroz O.S., Starchenko O.S.**

**STARTING CHARACTERISTICS OF STABILIZER BURNING DEVICES  
WHEN FUEL GAS SUPPLY IN THE RECIRCULATION ZONE**

*The article presents the results of experimental studies of the characteristics of torch ignition in microdiffusion burners, consisting of a system of poorly streamlined bodies – stabilizers, between which there is an air flow.*

*The combustion fuel is fed into the recirculation zone through a system of openings made in the output face of the stabilizer along its height. In experiments, the ignition of the flame was carried out from an aviation candle with a circular surface discharge gap. An electric candle was located at the end of one of the stabilizers. As a result of the research, the optimal location of the annular discharge gap of the candle was established, which provided reliable ignition at the minimum velocity of gas jets, that is fuel consumption, which corresponds to the maximum coefficient of excess air in the burner. It is established that the coefficient of excess air during ignition increases with the width of the stabilizer, the diameter of the gas hole and the temperature of the air, and decreases with increasing of the air velocity and of the coefficient of shading of the burner. The experiments have shown that increasing of the intensity of air turbulence adversely affects the torch ignition characteristics and makes it impossible to perform reliable calculations. The experimental data on the characteristics of the torch ignition from a surface discharge candle and obtained the experimental dependence makes it possible to perform a preliminary calculation of the characteristics of microdiffusion stabilizer burners with gas supply to the recirculation zone.*

**Key words:** *stabilizer burner, diffusion combustion, torch ignition, recirculation zone, air velocity, temperature.*

## РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.023.001.57

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/27>**Рязанцев М.О.**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Носач О.К.**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Рязанцев А.М.**

Красноармійський завод промислового обладнання

### ПРИЧИНИ ТА МЕХАНІЗМ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

**Мета.** Основною метою роботи є встановлення причин і розроблення деформаційного передвісника руйнування гірських порід.

**Методика.** В роботі наведено лабораторні експериментальні дані щодо деформування та руйнування гірських порід в об'ємному напруженому стані на установці нерівнокомпонентного об'ємного стискання конструкції Донецького фізико-технічного інституту Національної академії наук України (далі – ДонФТІ НАН України). Проаналізовано умови виникнення резонансних явищ за деформування та руйнування гірських порід.

**Результати.** Показано, що гірські породи є класичними ауксетиками, в яких пружні показники в процесі механічного навантаження змінюють величину та знак. Характерні деформації, за яких пружні характеристики змінюють свою величину, є квантованими й постійними для всіх матеріалів. Показано, що приріст деформацій є знакоперемінним, що підкреслює хвилювий характер деформацій. В процесі деформації виділено чотири характерних етапи, притаманних усім породам незалежно від виду напруженого стану й величини всестороннього тиску. Передвісником руйнування є резонансне зростання амплітуди приросту лінійних і зсувних деформацій на третьому етапі внаслідок подвійного вихро-хвилювого резонансу по швидкості, розмірах структур і частоті. У разі зрівняння за величиною модулів зсуву й об'ємного стискання (швидкості власного коливання часток породи та швидкості звуку в середовищі) виникає ударна хвиля й динамічне руйнування. За відсутності резонансу по швидкості спостерігається «повільна» течія.

**Наукова новизна.** Вперше показано, що пружні характеристики гірських порід не є константами матеріалу, а є структурно чутливими характеристиками опору деформації, що змінюються за величиною й за знаком під час механічного навантаження; зсувні деформації мають ротаційний характер. У процесі деформування гірських порід спостерігаються чотири характерних етапи. З точки зору руйнування найбільш цікавим є третій етап – резонансне зростання приросту максимальної, мінімальної та зсувної деформації. Коли модуль об'ємного стискання дорівнює модулю зсуву, виникає антирезонанс й ударна хвиля. Без ударної хвилі матеріал просто тече.

**Практичне значення** – резонансне зростання амплітуди приросту максимальної, мінімальної та зсувної деформації є критерієм руйнування взагалі й динамічного руйнування зокрема, що на практиці може використовуватися як передвісник або прогнозний критерій руйнування.

**Ключові слова:** приріст деформації, пружні модулі, спірально-вихрова хвиля, антирезонанс, руйнування.

**Постановка проблеми.** Історично так склалося, що проблема передбачення руйнування матеріалів взагалі й гірських порід зокрема вирішувалася шляхом створення так званих теорій міцності. Відсутність загальновизнаних достовірних і надійних критеріїв і передвісників руй-

нування свідчить про те, що шлях цей виявився тупиковим, проблема й досі залишається актуальною. Традиційні способи інтерпретації експериментальних даних, отриманих під час випробувань гірських порід на міцність, у вигляді діаграм «напруження – деформація» себе вичерпали,

тому основною метою досліджень є пошук причин і передвісників руйнування гірських порід в умовах об'ємного нерівнокомпонентного стискання з урахуванням того, що обмін енергією між об'єктами взаємодії має хвильовий характер, що всі структурні елементи планети (шари та блоки різних масштабних рівнів) є резонаторами.

Основною ідеєю досліджень є вивчення змін амплітуди приросту деформацій і величини пружних параметрів у процесі механічного навантаження. Тому науково-дослідні завдання полягали в проведенні лабораторних експериментів з випробування гірських порід в умовах нерівнокомпонентного об'ємного стискання з фіксацією в процесі навантаження приросту навантаження по трьох осях, а також амплітуди приросту лінійних, зсувних і об'ємних деформацій. Оскільки відношення приросту напружень до приросту деформацій має фізичний сенс пружних модулів, наступним завданням є аналіз їх змін у процесі навантаження. Крім лабораторних експериментів і нетрадиційного представлення їхніх результатів, завданням є аналіз сучасних уявлень про резонансні явища в гірському масиві, оскільки в авторів виникла впевненість, що основною причиною руйнування гірських порід є резонанс. Тому логіка подання дослідницького матеріалу полягає в тому, що спочатку викладається короткий огляд сучасних уявлень про резонансні явища, а потім отриманий експериментальний матеріал, що підтверджує резонансну причину руйнування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно з останніми теоретичними й експериментальними даними обмін енергією між об'єктами взаємодії має хвильовий характер [1, с. 10; 2, с. 95; 3, с. 101; 4, с. 124; 5, с. 3]. Всі структурні елементи планети Земля (гірські шари та блоки різних масштабних рівнів) є резонаторами, для яких збуджувальним джерелом коливань є комплексне Всесвітнє джерело хвильової енергії з періодом  $T = 160$  хв (частота  $f = 0,104$  МГц), яке складається з реактивної складової, що входить в Землю ортогонально її поверхні з усіх боків, і активної спіральньо-вихрової складової. Реактивна складова обумовлює зміну об'єму й викликає пульсацію і сфероїдальні коливання Землі та всіх її структурних елементів. Спіральньо-вихрова складова викликає обертання планети й тороїдальні коливання (поперечні до реактивної складової).

Спіральньо-вихрова хвиля, що виникає в резонаторі, може бути поляризована лінійно або по колу в залежності від умов збудження хвильового поля, наявності меж і їхніх характеристик.

Напрямок поляризації може змінюватися на протилежний через характерний просторовий розмір хвильового поля. В місцях такої зміни спостерігається лінійна поляризація. З цих міркувань площину екліптики можна вважати величезною площиною поляризації, де й відбувається рух планет Сонячної Системи по еліптичних орбітах (рис. 1). Орбіти зовнішніх планет кратні діаметру Сонця й довжині хвилі [6, с. 48].

Якщо погодитися з резонансною структурою Сонячної системи з планетами-резонаторами, то резонансний період їхніх коливань можна знайти, прирівнюючи відцентрову силу обертального (вихрового) руху й силу гравітації [2, с. 98]:

$$T_p = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{\gamma M}}, \quad (1)$$

де  $R$  – радіус планети;  $T_p$  – період її коливань як нульового джерела хвильових процесів;  $M$  – маса планети,  $\gamma$  – гравітаційна константа.

За резонансу в Сонячній системі довжина резонуючого ланцюга становить:

$$L_{cn} = n\lambda/4, \quad (2)$$

де  $\lambda = 46,32$  млн км – довжина хвилі, що поширюється в площині поляризації (площині екліптики);  $L_{cn}$  – відстань планети від Сонця, для Землі  $L_{cn} = 149,5 \dots 150,15$  млн км;  $n = 1, 3, 5, 7$  і так далі – непарні гармоніки (резонанс на поперечних хвилях відбувається тільки на непарних гармоніках). Для Землі  $n = 13$ . Період цієї гармоніки  $T_{13} = 4$  доби. Це так званий *резонанс третього роду або спінбарицентричний резонанс* [7], коли кожна планета обертається навколо Сонця, а разом з ним – навколо барицентру Сонячної системи. Рух кожної планети передається через Сонце-ретранслятор іншим планетам, і всі фізичні процеси синхронізуються. Цей резонанс відбивається в гірському масиві характерними сплесками кількості акустичних імпульсів, які повторюються точно через 4 доби (рис. 2).

Разом з резонансом третього роду присутній також *орбітальний резонанс або резонанс другого роду* [8], коли періоди обертання сусідніх космічних об'єктів по орбітах кратні один одному (Земля – Венера 8:5, Сатурн – Юпітер 2:3). Часто ці резонанси супроводжуються також *спінспіновими резонансами*, коли періоди обертання навколо власних осей також синхронізуються й космічні об'єкти повернуті один до одного одним боком (Земля – Місяць 1:1, Юпітер – Європа 1:1,



Земля – Венера за протистояння). У всіх космічних об'єктів є так званий *спін-орбитальний резонанс*, або *резонанс першого роду*, коли період обертання по орбіті кратний періоду обертання навколо власної осі (для Землі  $T_{\text{орб}} = 366T_{\text{об}}$ , для Меркурія  $T_{\text{орб}} = \frac{3}{2}T_{\text{об}}$ ).

Оскільки всі космічні об'єкти пульсують на одній частоті  $T_n = 160$  хв., слід відзначити появу *пульсаційно-спінного резонансу*, або (по аналогії з попередніми) *резонансу нульового роду*, коли період обертання космічного об'єкта навколо власної осі кратний періоду пульсації (для Землі  $T_{\text{об}} = 9T_n$ ).

Як показано в [2, с. 98], для випадку пульсації поверхні планети як хвильового джерела нульового порядку співвідношення

$$\frac{R^3}{MT_n^2} = \text{const} \text{ і } \frac{R^3}{MT_{\text{орб}}^2} = \text{const}, \quad (3)$$

де  $R$  – радіус планети;  $M$  – її маса;  $T_n = 160$  хв – період пульсації поверхні планети, постійний для

всіх об'єктів сонячної системи;  $T_{\text{орб}}$  – період обертання планети.

Періоди коливань поверхонь планет як джерела коливань нульового порядку й періоди їх обертання навколо осей пов'язані між собою співвідношенням:

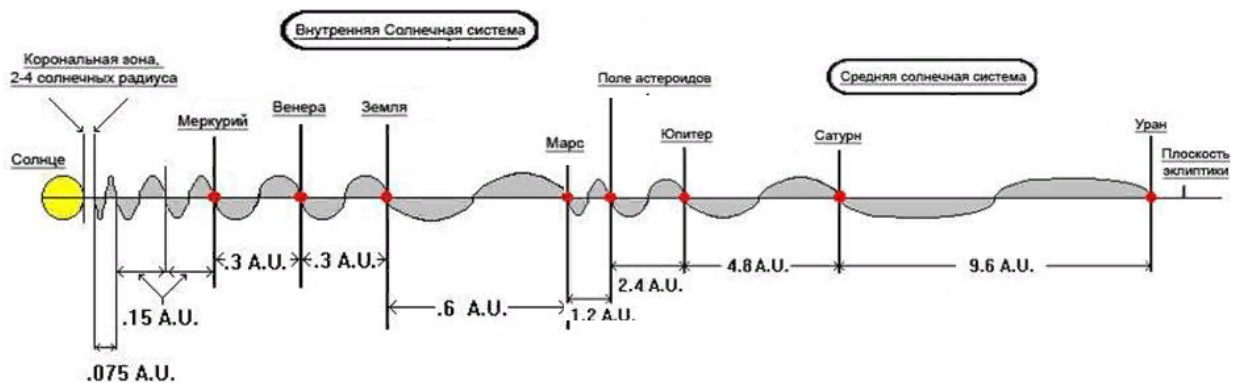
$$T_{\text{орб}} = nT_n, \quad (4)$$

де  $n$  – порядок гармоніки, за якого період обертання навколо осі резонує з періодом пульсації. Для Землі  $n = 9$ ,  $T_{\text{орб}} = 160 \cdot 9 = 1440$  хв. = 24 год. Це і є так званий *пульсаційно-спінний резонанс*.

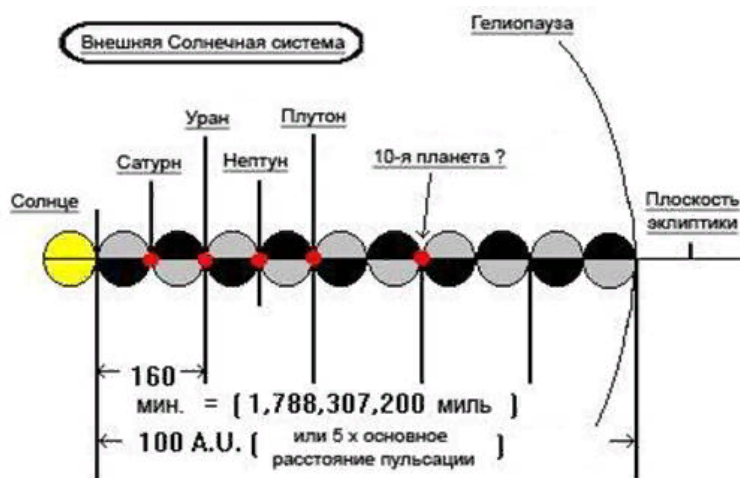
Для всіх дискретних систем макро- і мікро-рівнів запропонована універсальна хвильова константа [2, с. 97]:

$$K = \frac{4\pi^2 R^3}{MT_n^2} = \frac{3\pi}{\rho T^2} = \gamma, \quad (5)$$

де  $\rho$  – щільність планети-резонатора, для Землі середня щільність  $\rho = 5520$  кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – постійна гравітації,  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/кг·с<sup>2</sup>.



а)



б)

Рис. 1. Резонанс Стоункінга, що впливає на розташування планет: а – внутрішня й середня Сонячна система, показано тільки хвилю розширення (планети розташовані у вузлах); б – зовнішня Сонячна система: – хвиля стиснення; – хвиля розширення

Для Землі як гравітаційного резонатора в стійкому стані можна записати:

$$3 \neq \gamma = \rho T_3^2 = \text{const.}$$

Тут  $T_3$  – період основного власного коливання Землі як гравітаційного резонатора. Для Землі як твердої кулі отримаємо  $T_3 = 5058,1 \text{ с} = 84,38 \text{ хв}$ .

Середня швидкість поширення пульсації в надрах Землі становитиме:

$$V_p = \frac{2D}{T_3} = 2 \cdot 12700 / 84,38 \cdot 60 = 5,02 \text{ км/с.}$$

Середня швидкість поширення поперечної хвилі в надрах Землі становитиме:

$$V_s = \frac{D}{T_n} = 12700 / 84,38 \cdot 60 = 2,51 \text{ км/с.}$$

Як бачимо, періоди хвиль пульсації й торіодальних коливань збігаються, що свідчить про їхню синхронність і синфазність. В загальному випадку вони поширюються разом. Діаметр земної кулі як космічного об'єкта з атмосферою й усіма її іншими оболонками (рис. 3) може бути визначений через нульовий період пульсації  $T_0 = 160 \text{ хв}$  і становить  $D_0 = 24096 \text{ км}$ .

Як показано в [9, с. 59; 10, с. 48], спіральновихрове поле, що надходить від Сонця, на Землі під час взаємодії з її речовиною модулюється низькими частотами власних гравітаційних коливань (рис. 4), утворює сферичні або торіодальні солітони, і в цих формах під впливом фонового спіральновихвильового поля рухається з перемінними швидкостями і по перемінних напрямках.

В надрах Землі хвильова взаємодія з будь-яким шаром-резонатором також розпадається на два рухи: активний вихровий рух і реактивний пульсуючий. Шар або блок – резонатор розглядається як вторинний випромінювач (випромінює поперечні власні коливання). Загальна енергія джерело-резонатор залежить від амплітуд і фаз коливань, які є функціями збуджувальної частоти й параметрів самого резонатора. Система джерело – резонатор є системою з одним ступенем свободи, яка має одну резонансну й одну антирезонансну частоту.

Як показано в [11, с. 295], резонанс спостерігається лише на реактивній складовій, яку можна інтерпретувати як кульовий тензор деформацій (за всіма напрямками), що діє ортогонально поверхні, є півхвильовим, відбувається на всіх гармоніках і характеризується повним пропусканням хвилі від джерела без віддзеркалення й поглинання. Це явище отримало назву ефекту монохроматора.

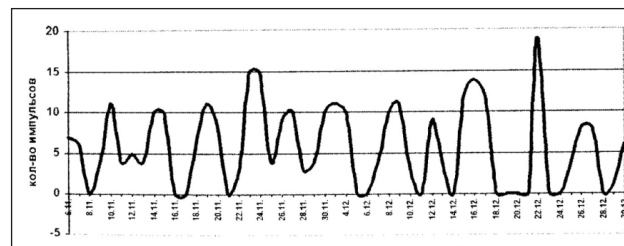


Рис. 2. Зміни кількості акустичних імпульсів у часі в 1-му північному конвеєрному штреку блока № 3 ПрАТ «ШУ «Покровське»

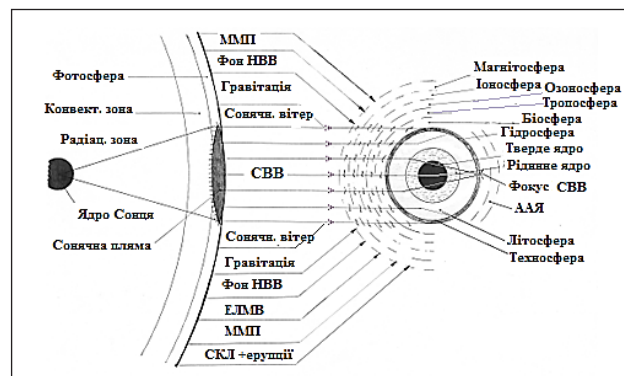


Рис. 3. Схема формування спрямованого потоку спіральновихвильового випромінювання (СВВ) з великої сонячної плями

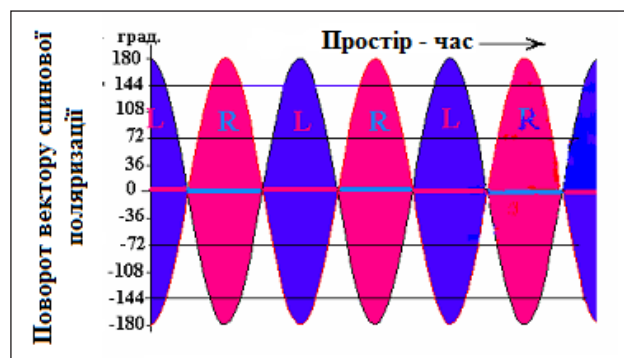


Рис. 4. Модуляційна складова вихрового поля за його 100% модуляції власними коливаннями низької частоти

Антирезонанс спостерігається тільки на активній (вихрово-поперечній) складовій, є хвильовим, відбувається тільки на непарних гармоніках і характеризується частковим віддзеркаленням від меж розподілу шарів і перетворенням решти енергії на власні поперечні коливання шару-резонатора, які поширюються вздовж меж шару, не виходячи за ці межі. Явище антирезонансу отримало назву ефекту акустичного резонансного поглинання.

За резонансу первинне хвильове поле посилюється, за антирезонансу – послаблюється, але суттєво зростає амплітуда власних спіральновихвильових коливань шару або блока-резонатора.

Резонансна частота пов'язана з характерним розміром об'єкта-резонатора:

$$f_{\text{мх}} = \frac{V_p}{2\ell} n, \quad (6)$$

де  $V_p$  – швидкість поздовжньої складової об'ємної хвилі;  $\ell$  – характерний розмір шару, блока (для шару – товщина);  $n$  – порядок гармоніки.

Антирезонансна частота визначається таким чином:

$$f_o = \frac{V_s}{\ell} n, \quad (7)$$

де  $V_s$  – швидкість поперечної складової об'ємної хвилі.

Для систем з багатьма ступенями свободи виникає ряд резонансних і ряд антирезонансних частот.

Для зон посилення й послаблення, що чергуються, за одночасної дії активного й пасивного (резонатора) випромінювачів значення сумарного потенціалу має вигляд [12, с. 172]:

$$\varphi = \varphi_1 \left[ 1 + \frac{\rho \omega S^2}{iZ(\omega) 4\pi d} \right], \quad (8)$$

де  $\varphi_1$  – потенціал, що створюється одним джерелом;  $S$  – площа поверхні резонатора;  $Z(\omega)$  – механічний імпеданс (акустичний опір) резонатора.

Слід відзначити, що механічний імпеданс має комплексний характер (має як активну  $R$ , так і реактивну  $X$  складові, що залежать від режиму роботи резонатора):

$$Z(\omega) = R + iX. \quad (9)$$

Для системи «джерело – резонатор» з багатьма ступенями свободи, зони посилення й послаблення, що чергуються, визначаються з умови:

за  $\left[ 1 + \frac{\rho \omega S^2}{iZ(\omega) 4\pi d} \right] > 1$  система працює в посилюючому режимі;

за  $\left[ 1 + \frac{\rho \omega S^2}{iZ(\omega) 4\pi d} \right] < 1$  реалізується за послаблення;

за  $\left[ 1 + \frac{\rho \omega S^2}{iZ(\omega) 4\pi d} \right] = 1$  наявне чергування переходів зон посилення з зонами послаблення.

Імпеданс (опір) резонатора, за якого ці переходи можливі, називають граничним  $Z_{\text{гр}}(\omega)$ . З останнього рівняння витікає значення граничних імпедансів:

$$Z_{\text{гр}1} = \pm \infty \text{ і } Z_{\text{гр}2} = 1/2 Z_{\text{ар}}.$$

Тут  $Z_{\text{ар}}$  – вхідний опір (імпеданс) резонатора, за якого він налаштований на антирезонанс.

$$Z_{\text{ар}} = \frac{i\rho CS(kr_o)^2}{4\pi d} = \frac{i\sqrt{\rho GS}(kr_o)^2}{4\pi d},$$

де  $r_o$  – ефективний (характерний) розмір резонатора;  $\rho$  – щільність середовища;  $\omega$  – резонансна частота;  $d$  – відстань між джерелом і резонатором;  $k$  – хвильове число;  $C$  – фазова швидкість хвилі в середовищі,  $C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ ;  $G$  – модуль зсуву резонатора.

Система працює з посиленням, коли модуль об'ємного стискання проходить через безкінечність  $K = \infty$  і змінює знак або зменшується; з послабленням – коли модуль зсуву зменшиться в 4 рази та хвильовий опір дорівнюватиме половині антирезонансного. Коли модулі зсуву та об'ємного стискання зрівнюються, виникає ударна хвиля, значне зростання амплітуди поперечних (вихрових) коливань і руйнування в динамічному режимі.

В [13, с. 416] показано, що натеper розрізняють чотири види резонансів:

– резонанс по швидкості й частоті – збудження коливальною системою одного набору частот з можливого спектра;

– структурно-хвильовий резонанс по швидкості й розмірах – збудження коливальною системою її структурних елементів, коли характерні розміри структурного елементу близькі або кратні розмірам системи;

– подвійний вихро-хвильовий резонанс по швидкості, розмірах, частоті й параметрах вихрових структур, що є причиною різкої зміни сил взаємодії між структурним елементом і середовищем з утворенням нових диспергувальних хвиль і вихрових структур;

– структурний резонанс – резонансна взаємодія через середовище кількох несиметричних систем з межами розподілу або вихровими структурами.

Всі гео- і газодинамічні явища в гірському масиві пов'язані з третім і четвертим видом резонансів, тому доцільно провести їх експериментальні дослідження й натурні спостереження.

**Постановка завдання.** Дослідження змін приросту деформацій і пружних параметрів гірських порід з метою встановлення резонансних явищ під час їх деформування та руйнування.

**Методи дослідження.** Для досягнення мети застосовувалися лабораторні дослідження пове-

дінки гірських порід в умовах нерівнокомпонентного об'ємного стискання на установці нерівнокомпонентного тривісного стискання (УНТС) конструкції ДонФТІ НАН України та було змінено спосіб представлення отриманих експериментальних даних.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Інформативність експериментальних досліджень значною мірою визначається типом експериментального обладнання, кількістю показників, що фіксуються під час проведення експерименту, методикою оброблення отриманих даних, способом їх представлення й аналізу.

Експерименти з випробування гірських порід в умовах нерівнокомпонентного стискання ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) проведено на установці нерівнокомпонентного тривісного стискання конструкції ДонФТІ НАН України (рис. 5).



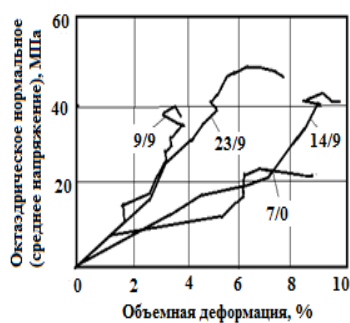
Рис. 5. Установка нерівнокомпонентного тривісного стискання конструкції (УНТС) ДонФТІ НАН України

Традиційно результати досліджень поведінки порід в умовах нерівнокомпонентного стискання наводять у вигляді діаграм: «кульовий тензор напружень – відносна об'ємна деформація»,

«октаедричне дотичне напруження – відносна октаедрична дотична (зсувна) деформація», «максимальне напруження – максимальна деформація» тощо. Вказані діаграми допомагають визначити пружні параметри (модуль об'ємного стискання, модуль зсуву, коефіцієнт поперечної деформації), характерні деформації, за яких пружні параметри змінюються стрибком, закономірності зміни міцності порід від виду напруженого й деформаційного стану тощо. Але ні абсолютна величина навантаження, ні величина відносних деформацій в загальному випадку критерієм руйнування бути не можуть навіть для одного і того ж виду напруженого стану, або одного й того ж самого кульового тензора напружень. Межа міцності та гранична відносна деформація залежать від багатьох факторів, вплив яких навіть не завжди усвідомлюється.

Для прикладу, на рис. 6 і 7 наведено діаграми «кульовий тензор напружень – відносна об'ємна деформація» і «октаедричне дотичне напруження – відносна октаедрична дотична (зсувна) деформація».

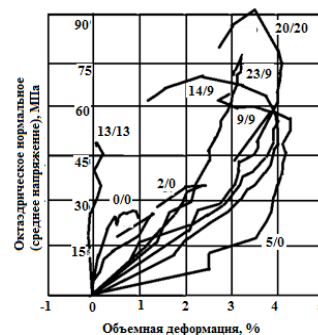
Наведені діаграми добре віддзеркалюють зміни відносних деформацій у процесі навантаження. На них видно перелами зі стрибкоподібною зміною модулів пружності, що свідчать про наявність електронних і структурно-фазових переходів у мінералах, з яких складаються гірські породи. На рис.6 добре видно структурно-фазові переходи першого і третього роду. Переходи першого роду йдуть зі зменшенням об'єму в умовах постійного тиску, а третього роду (так звані критичні переходи) – зі збільшенням об'єму за зростання тиску. Про структурно-фазові переходи другого роду свідчать стрибкоподібні зміни модулів усестороннього стискання на рис. 6 і модулів зсуву на рис. 7.



а)



б)



в)

Рис. 6. Залежність «октаедричне нормальне напруження (кульовий тензор) – об'ємна деформація» для об'ємного напруженого стану (через дріб вказано величини проміжного й мінімального напруження): а) для вугілля; б) для аргілітів; в) для пісковиків



З діаграм «середнє напруження – об'ємна деформація» (рис. 7) добре видно, що модуль об'ємного стискання в процесі навантаження закономірно зростає, а на порозі дилатансії (межі стискання) проходить через точку біфуркації ( $+^{\circ}$ ) і змінює знак (зменшення об'єму змінюється збільшенням об'єму). Цю точку називають структурно-фазовим переходом третього роду, або критичним переходом. Інколи одразу за цим відбувається руйнування. Але в більшості випадків спостерігається зміцнення породи (наклеп), коли численні тріщини, що утворилися внаслідок збільшення об'єму під час структурно-фазового переходу, заважають одна одній поширюватися. Модуль зсуву (рис. 7), навпаки, на початку стискання має дуже великі, в тому числі й від'ємні значення, проходячи через точку біфуркації

( $-^{\circ}$ ), змінює знак на позитивний і неспинно зменшується до виникнення антирезонансу.

На рис. 8 представлені діаграми «максимальне напруження – максимальна деформація» для пісковиків і вугілля. Наведені дані дають змогу встановити міцність порід, модулі пружності та спаду, характерні максимальні лінійні деформації, за яких модулі змінюються стрибком (рис. 8, а). Традиційно діаграми малюють згладженими, але перелами (особливо в породах) є настільки чіткими, що згладжування спричинює втрату фізичного сенсу. Неважко помітити, що й у вугіллі, і в пісковицях спостерігаються шість-сім характерних точок переламу діаграми. Характерні деформації, за яких відбуваються стрибки модулів пружності, доповнюють єдиний ряд 0,64; 1,0; 1,5; 1,8; 2,25; 2,6; 3,0; 3,7; 4,6; 5,8; 6,3; 7,0; 8,3; 9,7;

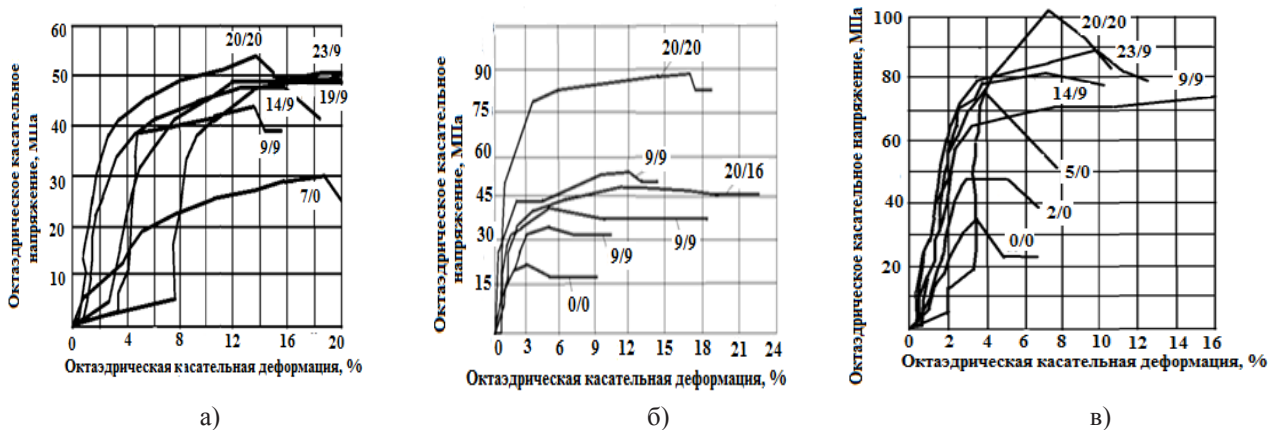


Рис. 7. Залежність «октаедричне дотичне напруження – октаедрична зсувна деформація» для об'ємного напруженого стану (через дріб вказано величини проміжного й мінімального напруження): а) для вугілля; б) для аргілітів; в) для пісковиків

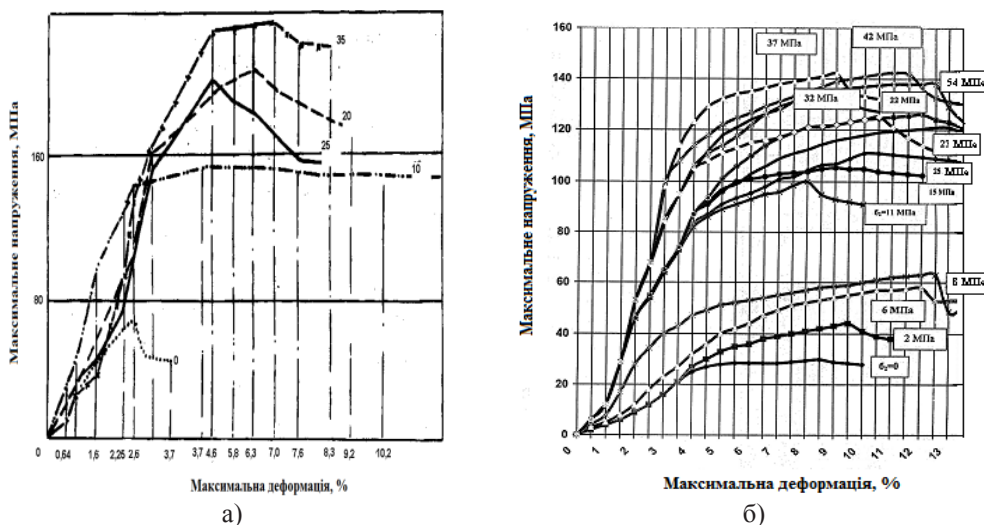


Рис. 8. Діаграми «максимальне напруження – максимальна деформація» для пісковиків за  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$  (а) і для вугілля за різних значень мінімального  $\sigma_3$  і проміжного  $\sigma_2$  стискальних напружень (б)

11,2; 12,7; 13,7; 14,5; 16,3%, який підпорядковується універсальному прояву структурної гармонії – закону золотого перетину й може бути представлений у вигляді:

$$\gamma_N = \left(\frac{1}{\Phi}\right)^{\frac{1}{2} + \frac{1}{4}}; s_N = \Phi \left(\frac{1}{\Phi}\right)^{\frac{1}{2} + \frac{1}{4}}; \varepsilon_N = \Phi^2 \left(\frac{1}{\Phi}\right)^{\frac{1}{2} + \frac{1}{4}};$$

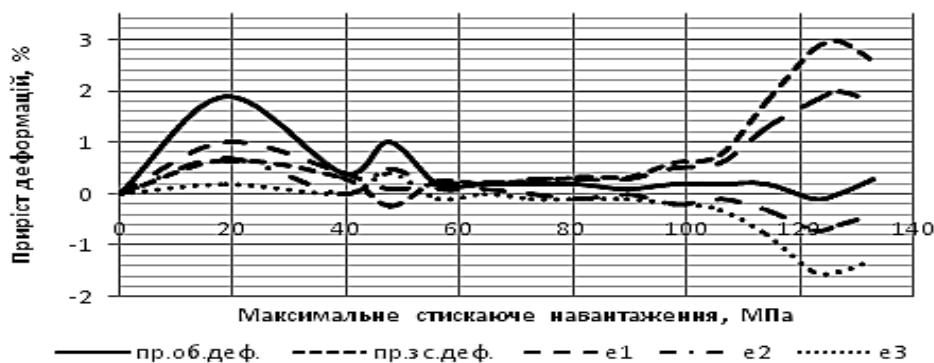
де  $\gamma_N$ ,  $s_N$ ,  $\varepsilon_N$  – зсувна, вихрова (ротаційна) й нормальна (лінійна) деформація відповідно;  $\Phi = 1,618$  – число Фідія (золоте число);  $\ell = 1,2,3 \dots$  – будь-яке ціле квантове число.

Традиційний підхід до інтерпретації отриманих експериментальних даних на цьому себе вичерпав, тому в роботі пропонується, перш за все, дослідження приросту всіх трьох деформацій у процесі навантаження, їхньої зміни та впливу на пружні параметри гірських порід, оскільки за визначенням пружні модулі є відношенням приросту навантаження до приросту деформацій.

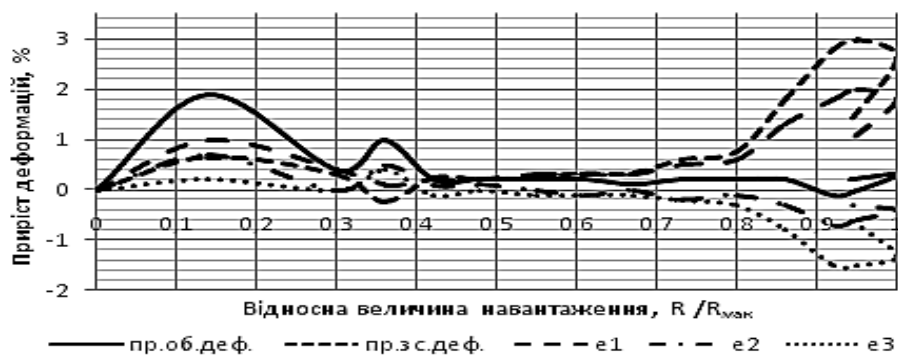
Фіксація деформацій під час випробувань призматичних зразків гірських порід здійснювалася механічними датчиками годинникового типу з

точністю  $10^{-6}$  м. Тензорезисторні датчики руйнівні деформації до 10–20% зафіксувати неспроможні. Максимальне зовнішнє навантаження, що формується на зразку розміром  $50 \times 50 \times 50$  мм, під час роботи манометра в безпечній зоні становить приблизно 400 МПа. Для відповідної й синхронної фіксації деформацій ступінь навантаження становив 2 МПа. Для отримання надійних результатів для кожного експерименту проводилося не менше як три випробування.

На рис. 9, 10 наведено дані зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних відносних деформацій у процесі навантаження зразка вугілля за різних видів напруженого стану. Аналогічні залежності наведено на рис. 11, 12 для пісковику. Дані наведені двічі: залежність приросту деформацій від абсолютної величини максимального стискального напруження й від відносної величини (поточне значення віднесене до руйнівного). Це дає змогу оцінити наочно подібність залежностей для всіх порід і всіх видів напруженого стану.



а)



б)

Рис. 9. Зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних деформацій у процесі навантаження зразка вугілля за  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 20$  МПа від абсолютної величини максимального стискального напруження (а) й відносної величини максимального навантаження (віднесене до руйнівного) (б)

Аналізуючи наведені дані, варто констатувати, що процес деформування гірських порід за механічного навантаження в умовах нерівнокомпонентного тривісного стискання можна розділити на чотири етапи:

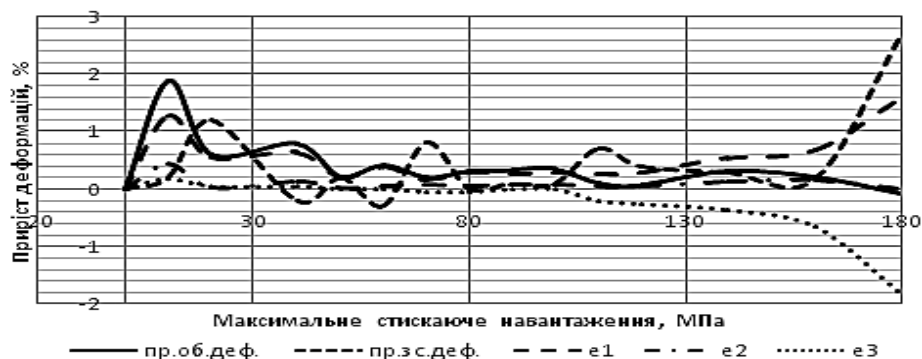
1 – інтенсивне зменшення об'єму на початковій стадії деформування практично без зміни форми (за навантажень до 0,3-0,4 від руйнівних);

2 – зменшення приросту об'ємної деформації до нуля (досягнення порогу дилатансії або точніше межі стискання), коливання приросту решти деформацій з амплітудою не більше 0,5% (за навантажень до 0,6–0,75 від руйнівних);

3 – різке зростання приросту зсувних, мінімальної й максимальної лінійних деформацій до кількох відсотків (за навантажень 0,85–0,99 від руйнівних), збільшення об'єму породи;

4 – інверсія приросту всіх видів деформацій і динамічне руйнування породи з різким спадом навантаження (спостерігається практично перед руйнуванням за 0,99 від руйнівного навантаження). За відсутності спаду навантаження відбувається пластичний коливальний зсувний процес (течія).

Наявність третього етапу, за якого амплітуда приросту лінійних і зсувних деформацій зростає в кілька разів (від десятих часток відсотка до кількох відсотків), свідчить про наявність резонансних явищ. Перехід руйнування в динамічне або в течію пов'язаний з типом резонансу. Для виявлення відповідності типу резонансу теоретичним уявленням, наведеним вище, розглянемо зміни пружних параметрів у процесі навантаження. На рис. 13 і 14 наведено дані зміни модуля всебічного стискання, модуля зсуву й коефіцієнта поперечної деформації для вказаних вище зразків. Наведені дані свідчать про те, що вугілля й пісковик є класичними ауксетиками та мають від'ємний коефіцієнт поперечної деформації. Модуль зсуву до межі стискання періодично змінюється, проходячи в пісковиках через точку біфуркації ( $-^{\circ}$ ), а після досягнення межі стискання поступово зменшується практично до нуля. Модуль об'ємного стискання періодично змінюється до межі стискання, на межі стискання різко зростає, часто проходячи через точку біфуркації ( $+^{\circ}$ ), а після точки біфуркації різко зменшується, набуваючи від'ємних значень. У процесі навантаження модулі зрівнюються кілька разів (наступає резонанс



а)



б)

Рис. 10. Зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних деформацій у процесі навантаження зразка вугілля за  $\sigma_1=\sigma_2>\sigma_3=22$  МПа

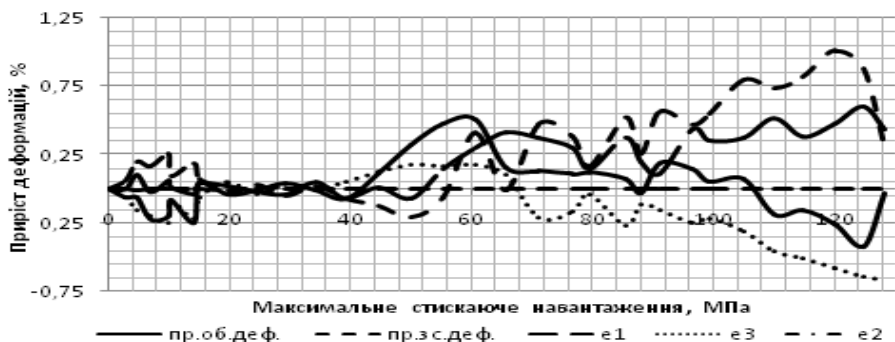


а)

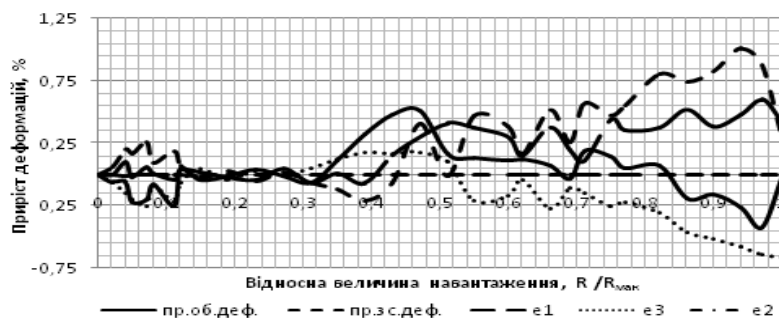


б)

Рис. 11. Зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних деформацій у процесі навантаження зразка пісковику за  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 23$  МПа;  $\sigma_3 = 9$  МПа



а)



б)

Рис. 12. Зміни приросту об'ємних, зсувних і лінійних деформацій у процесі навантаження зразка пісковику за  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 13$  МПа



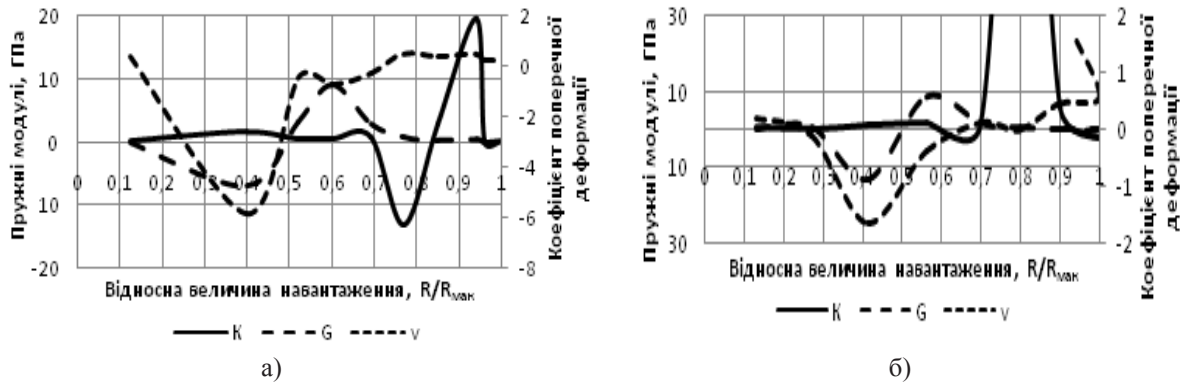


Рис. 13. Зміна пружних параметрів у процесі навантаження для вугілля:

а – за  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  ( $\sigma_2 = 23$  МПа;  $\sigma_3 = 9$  МПа);

б – за  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  ( $\sigma_2 = 30$  МПа;  $\sigma_3 = 20$  МПа);

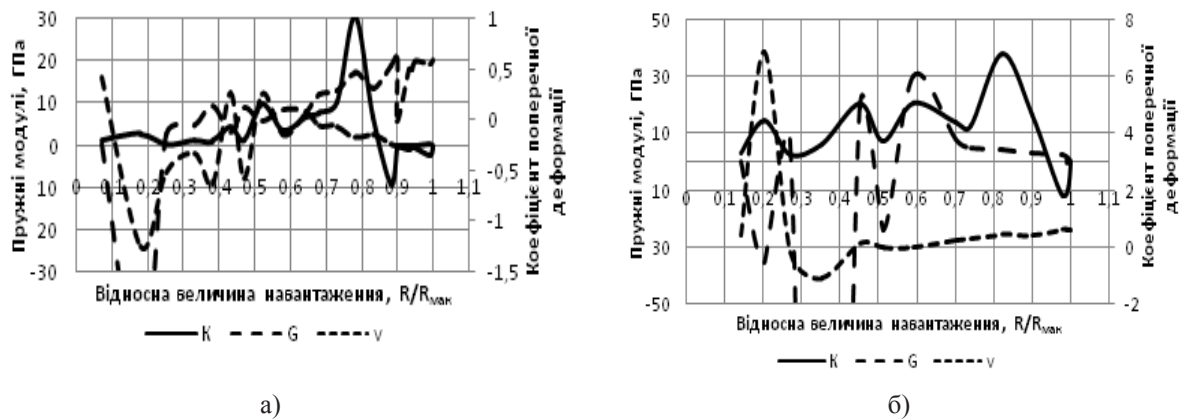


Рис. 14. Зміна пружних параметрів у процесі навантаження для пісковика:

а – за  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 9$  МПа; б – за  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  ( $\sigma_2 = 35$  МПа;  $\sigma_3 = 20$  МПа);

по швидкості), але до межі стискання це стається за протифазної зміни модулів і відбувається резонанс у режимі монохроматора (течія під дією об'ємної складової деформаційного поля). Лише після біфуркації модуля всебічного стискання обидва модулі зрівнюються за синфазного зменшення й наступає антирезонанс у режимі акустичного резонансного поглинання (АРП) з різким зростанням приросту амплітуди деформації (на величину добротності). Коли модуль зсуву й модуль об'ємного стискання зрівнюються (швидкість переміщення часток речовини перевищує швидкість звуку), виникає ударна хвиля й динамічне руйнування. Якщо ударна хвиля не виникає, руйнування відбувається у вигляді течії.

**Висновки.** Таким чином, основною причиною механічного руйнування гірських порід є подвій-

ний резонанс по швидкості, розмірах і частоті. Спочатку резонанс відбувається на частоті монохроматора (модуль об'ємного стискання зростає до безкінечності), виникає течія, потім на частоті антирезонансу, коли модуль зсуву зменшується відносно резонансного в 4 рази й швидкість переміщення частин у спіральні-вихровій хвилі перевищує швидкість звуку в середовищі, виникає ударна хвиля й динамічне руйнування. Оскільки різниця між частотами резонансу й антирезонансу становить біля 15%, можливий перехід течії в динамічне руйнування з певним запізненням.

Передвісником і критерієм руйнування гірських порід є резонансне зростання на порядок амплітуди приросту максимальної та мінімальної лінійних деформацій.

#### Список літератури:

1. Чечельницький А.М. Волновая структура Солнечной системы. Дубна : Международный университет «Дубна», 2000. 75 с.
2. Кумченко Я.А. Технология и обоснование необходимости мониторинга космической погоды для прогнозирования локальных земных катастроф. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 4 (61). С. 95–103.

3. Епифанов В.А. Геогалактические пульсации, пространство – время Земли и гармония стратиграфической шкалы. *Федеральное государственное унитарное предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья»*. Новосибирск. 2012. № 4 (12). С. 90–103.
4. Петров Н.В. Витакосмология: основы для понимания реального знания. Ч. 2. Санкт-Петербург : Береста, 2013. 388 с.
5. Басин М.А. Волны. Кванты. События. Волновая теория взаимодействия структур и систем. Ч.1. Санкт-Петербург : Норма, 2000. 168 с.
6. Уилкок Д. Божественный космос. ЛитЛайф [Электронная библиотека]. 2010. 70 с. URL: <http://divinecosmos.e-puzzle.ru/>.
7. Хлыстов А.И., Клиге Р.К., Сидоренков Н.С. Резонанс третьего рода в Солнечной системе. *Современные проблемы наук о Земле и исследования Солнечной системы* : Сагитовские чтения, 30–31 мая 2011 г., Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга Московского государственного университета. 2011. 39 с. URL: <http://infm1.sal.msu.ru/grav/Russian/life/chteniya/sagit2011/Y\Hlystov2011.pdf>.
8. Молчанов А.М. Гипотеза резонансной структуры Солнечной системы. *Пространство и время*. 2013. № 1 (11). С. 34–48.
9. Никольский Г.А. О пятом взаимодействии. *Торсионные поля и информационные взаимодействия – 2009* : материалы междунар. научн. конф., Хоста – Сочи, 25–29 августа 2009 г. Москва : 2009. С. 56 – 75.
10. Никольский Г.А. Энергетика солнечно-вихревого излучения и его взаимодействие с веществом. *Торсионные поля и информационные взаимодействия – 2009* : материалы междунар. научн. конф. Хоста – Сочи, 25–29 августа 2009 г. Москва : 2009, С. 46–55.
11. Гликман А.Г. Эффект акустического резонансного поглощения (АРП) как основа новой парадигмы теории поля упругих колебаний. *Геофизика XXI столетия: 2003–2004 годы* : сборник трудов Пятых и Шестых геофизических чтений. В.В. Федынского. Москва – Тверь: ГЕРС. 2005. С. 293–299.
12. Кумченко Я.А. Единая резонаторная природа силового взаимодействия в микро- и макромире: альтернативная теория. *Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики* : збірник наукових праць. Кривий Ріг : Видавничий відділ НацМетАУ, 2002. Т. 2. С.162–177.
13. Басин М.А. Вихре-волновой резонанс. *Синергетика и методы науки* : труды семинара. Санкт-Петербург : Наука, 1998. С. 415–418.

#### Riazantsev M.O., Nosach O.K., Riazantsev A.M. CAUSES AND MECHANISM OF ROCK BREAKING

**Objective** is determine reasons and development of deformation signs of rock breaking.

**Methodology** – The paper represents laboratory experimental data concerning rock deformation and breaking in volumetric stress state in terms of the plant of unequal-component volumetric uniaxial compression designed by DonPhTI of the NAS of Ukraine. Condition of the development of resonance phenomena, while rock deforming and breaking, have been analyzed.

**Results** – It has been demonstrated that rock is a classic auxetics in which elastic parameters change their value and sign in the process of mechanical loading. Characteristic deformations, in terms of which elastic characteristics change their value, are quantified and constant for all the materials. It has been shown that deformation increment is with alternating signs that highlights wave nature of the deformation. During deformation, four characteristic stages have been singled out that's is peculiar for all the rocks irrespective of the type of stress state and value of extensive pressure. Sign of breaking is represented by resonant increase in the amplitude of increment of linear and shearing deformations at stage three due to double vortex- wave resonance in terms of velocity, structural dimensions, and frequency. While comparing as for the values of shearing modulus and volumetric compression (velocity of proper oscillation of rock particles and sound velocity within the medium), shock wave and dynamic breaking take place. If there is no velocity resonance, then «slow» flow is observed.

**Scientific novelty** – For the first time, it has been demonstrated that elastic characteristics of rocks are not the material constants but they are structurally sensitive characteristics of deformation resistance with changes in their value and sign while mechanical loading; shearing deformations are of rotational nature. Process of rock deformation includes four characteristic stages. From the viewpoint of breaking, stage three is the most interesting one – resonant increase in the increment of maximum, minimum, and shearing deformation. When modulus of volumetric compression is equal to a shearing modulus, anti-resonance and shock wave take place. If there is no stock wave, then the material just flows.

**Practical implications** – resonant increase in the amplitude of increment of maximum, minimum, and shearing deformation is the criterion of breaking in general and the criterion of dynamic breaking in particular; in practice, it can be used as a sign or prognostic criterion of breaking.

**Key words:** increment of deformation, moduli of elasticity, spiral-vortex wave, anti-resonance, breaking.

**Сергієнко О.І.**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Когтєва О.П.**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Уваров М.О.**

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

## ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В'ЯЗКО-ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ОДНОРІДНОГО МАСИВУ НАВКОЛО ОДИНОЧНОЇ ВИРОБКИ

У статті розглянута можливість за допомогою чисельного моделювання досліджувати напружено-деформований стан однорідного масиву навколо одиночної виробки за зміни фізико-механічних властивостей порід з урахуванням в'язко-пружних деформацій.

Для визначення впливу вологості на фізико-механічні властивості порід були проведені лабораторні дослідження з використанням зразків пісковика шахти «Капітальна» Донецького вугільного басейну.

Водонасичення, на відміну від сухого стану, як показали лабораторні випробування, призводить до пластичних деформацій зі значним зниженням межі міцності під час стискування. Було встановлено, що в насиченому водою стані межа міцності та модуль пружності зменшувалися, а коефіцієнт поперечних деформацій збільшувався.

В результаті моделювання видно, що зона максимального опорного тиску для сухого масиву утворюється на контурі виробки, а для вологого масиву – має певну відстань від контуру виробки на 1,5–2,5 м, залежно від глибини залягання виробки.

Під дією тиску відбувається зменшення корисної висоти виробки. Для сухого масиву за лінійним законом, а для масиву у зволоженому стані процес описується у вигляді полінома 3-го ступеня. Під час навантаження моделі від 45 МПа висота виробки дорівнює 0 м, тобто виробка є «задавленою».

Зміна максимального напруження бічних порід (опорного тиску) сухого масиву відрізняється від максимального напруження бічних порід вологого масиву за рахунок впливу вологості на їх фізико-механічні властивості. Так, водопоширення у масиві змінює пружно-крихкі властивості порід на в'язко-пружні.

За зміни форми виробки у результаті дії пластичних деформацій також змінюється і коефіцієнт концентрації напруження. Пластичні деформації відбуваються поки є вільний простір для них, тому відбувається повне «здавлення» виробки.

Так, завдяки моделюванню з використанням в'язко-пружних деформацій можна отримати більш адекватні результати з визначення напружено-деформованого стану порід навколо гірничих виробок.

**Ключові слова:** фізико-механічні властивості, напружено-деформований стан, водонасиченість порід, чисельне моделювання, в'язко-пружні деформації.

**Постановка проблеми.** На стійкість гірничих виробок передусім впливає фізико-механічний стан порід, які оточують виробку. Перекріплення виробок, взяття підживлення не вирішує повністю цієї проблеми. Погіршення стану гірничої виробки – це пряма загроза небезпеки праці шахтарів. Тому визначення напружено-деформованого стану масиву порід навколо гірничої виробки за різних його фізико-механічних властивостей є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних досліджень впливу вологості на фізико-механічні властивості порід показав: насичення рідиною значно впливає на пружність гірських порід. Було встановлено, що тривале водонасичення значно зменшує опір стисненню. Також доведено, що за водонасичення порід вони мають більший розкид середніх значень коефіцієнтів варіації, ніж у сухому стані [1]. Автор роботи [2], спираючись на дослідні дані, вважає, що зміна пружних властивостей гірських порід, зумовлених ступенем вологості, має суттєво нелінійний характер. За низьких рівнів водонасичення пружні властивості показують достатньо швидку зміну – зменшення модуля Юнга та збільшення коефіцієнта Пуассона. В роботі [3] дослідження

стосуються впливу початкового пошкодження на міцність та інші механічні показники та їх зміни від характеру мікротріщин. Автори B. Vászrhelyi, M. Davarganah [4] дійшли висновку – деякі механічні параметри гірської породи залежать від ступеня насиченості водою, але також залежність зумовлена складом самої породи.

Отже, метою цих наукових досліджень є визначення впливу змінення їх фізико-механічних властивостей на напружено-деформований стан гірських порід навколо гірничих виробок.

У результаті лабораторних досліджень [5] з визначення впливу вологості на фізико-механічні властивості гірських порід отримані наступні результати: при навантаженні сухого зразка відбувається крихке руйнування, а для вологих проб спостерігається наявність пластичної деформації, коли за її збільшення напруження майже не змінюється, але зменшується приблизно у два рази в порівнянні з самою межею міцності. Механічні властивості за зволоження пісковику, вологоємність якого досягає діапазону 2–3%, мають такі середні значення: межа міцності на стиснення зменшується майже у 2 рази; модуль пружності зменшується – у 4 рази; – коефіцієнт поперечної деформації збільшується у 2,3 рази.

У роботі [6] описано альтернативний метод випробувань швидкості деформації під час проведення досліджень на трьохвісне стиснення на зразках чотирьох типів гірських порід, включаючи пісвик. Випробування проводились за різних умов тиску та вологості. Було визначено, що максимальна міцність і зміни після дії навантаження суттєво залежать від швидкості навантаження. Також авторами визначено, що залежність швидкості навантаження в ділянці післяруйнування пов'язано зі станом вологості і в ділянці піку міцності вплив води буде більший, ніж вплив тиску.

Автори [7] у своїх дослідженнях зразків сухого та насиченого водою зразків пісковику на трьохвісне навантаження дійшли таких висновків та результатів: у насичених водою зразках когезія кут внутрішнього тертя та модуль Юнга зменшуються, а коефіцієнт Пуассона збільшується. Також визначили, що характеристики руйнування зразків пісковику пов'язані з початковим тиском, і що руйнування пісковику під час випробування на розвантаження є більш серйозним, ніж під час випробування на навантаження, особливо для сухих зразків. Пісвик більш схильний до утворення внутрішніх тріщин під дією води, а поглинена енергія під час розвантаження здебільшого сприяє пошкодженню породи, що своєю чергою

вказує на те, що вірогідність вибуху в гірській породі в насичених водою зразках породи нижче, ніж у зразків у сухому стані.

**Постановка завдання.** Для визначення напружено-деформованого стану масиву порід навколо виробки, треба задатися геометричними параметрами, граничними умовами та навантаженням моделі (рис. 1).

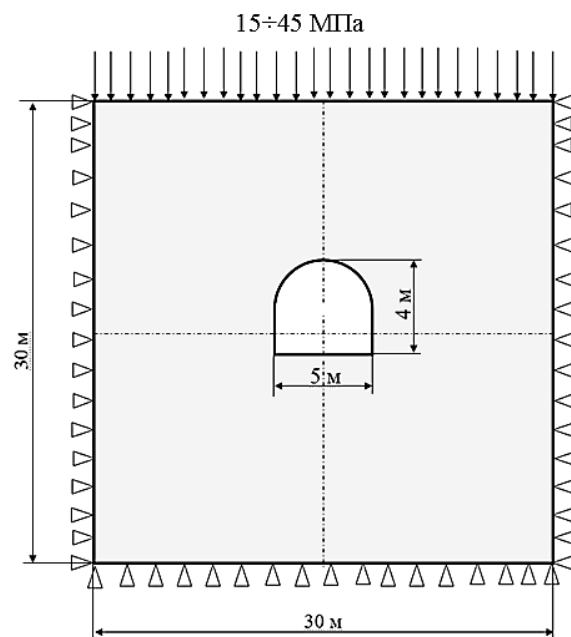


Рис. 1. Розрахункова схема та граничні умови для чисельного моделювання

Геометричні параметри: візьмемо найбільш стандартні розміри виробки: висота – 4 м, ширина – 5 м. Розміри моделі – 30×30 м, щоб виключити граничний вплив моделі на напружений стан порід навколо виробки.

Навантаження моделі: бічний тиск буде формуватися шляхом поперечних деформацій. Визначати напружений стан будемо за різного тиску навантаження від 15 МПа до 45 МПа, з кроком 10 МПа, що відповідає тиску на глибині від 600 м до 1800 м.

Властивості моделі: припустимо, це буде однорідний масив, який складається з пісковику за різних умов впливу зовнішніх факторів, наприклад, вологості. Таким чином, використовуємо властивості сухого та вологого пісковику. За результатами лабораторних досліджень, навантаження пісковику  $L, SI$ , ВП «Шахти «Капітальна» ДП «Мирноградвугілля» Донецького вугільного басейну, отримані діаграми навантаження зразків сухого та волого пісковику (рис. 2, 3), межа міцності на стиснення яких дорівнює 57,8 МПа, та 13,92 МПа відповідно.



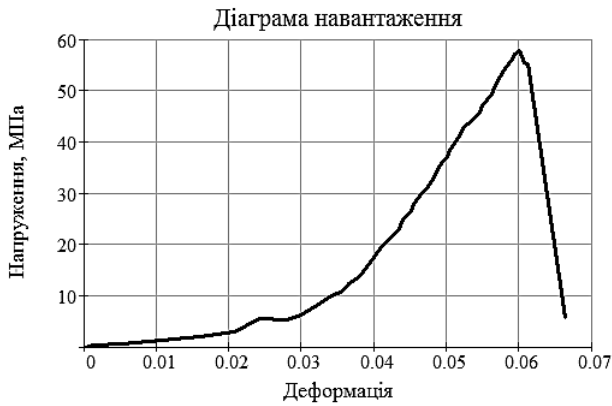


Рис. 2. Графік залежності нормальних напружень від деформації сухого зразка

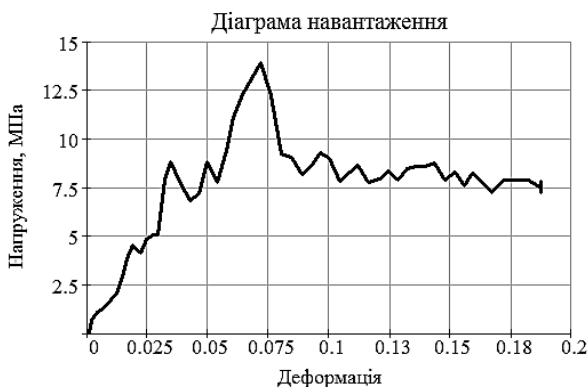


Рис. 3. Графік залежності нормальних напружень від деформації волого зразка

Під час навантаження сухого зразка відбувається крихке руйнування, а для вологих проб спостерігається наявність пластичної деформації, коли за її збільшення напруження майже не змінюється, але зменшується приблизно у два рази в порівнянні з самою межею міцності. Повна деформація волого зразка майже у 3 рази більше деформації сухого.

До розрахунку прийняті моделі двох типів: перша – це модель з механічними властивостями сухого масиву; друга – з механічними властивостями вологого масиву.

Матеріал вважається в'язко-пружним, якщо має як пружну (оборотну) частину, так і в'язку (необоротну) частину деформацій. Під час навантаження пружна зміна форми відбувається миттєво, тоді як в'язка частина деформації розвивається протягом деякого часу [8; 9].

Введення в'язко-пружної моделі передбачає використання квазістатичних крайових величин для вирішення завдання про механічне деформування лінійних в'язко-пружних твердих тіл.

Модель Максвелла можна представити у вигляді чисто в'язкого поршня і чисто пружної пружини, сполучених послідовно.

Модель описується таким рівнянням:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt}$$

За цією моделлю, якщо матеріал знаходиться під постійним навантаженням, напруга поступово слабшає. Якщо матеріал знаходиться в постійному напруженні, у навантаження два складники:

- 1) пружний компонент, який виявляє себе миттєво, представляючи собою пружину, і розслаблюється негайно у разі зняття напруження;
- 2) в'язкий компонент, який росте з часом, поки є напруження.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Чисельне моделювання напружено-деформованого стану відбувалося за допомогою програми ANSYS, з використанням в'язко-пружних деформацій з різною межею плинності.

В результаті розрахунку отримані дані напружень та деформацій окремо для сухого та вологого масиву (рис. 4).

Максимальні напруження з зростанням навантаження моделі мають збільшуватися не за лінійним законом, так як у розрахунку задається поріг плинності, після якого відбуваються пластичні деформації (рис. 5).

Отже, у першому разі, де моделюється сухий масив, деформації навколо виробки не впливають на її стан (рис. 4), а зростання максимального напруження у масиві відбувається за законом полінома другого або третього ступеня (рис. 5).

У другому разі, де моделюється вологий масив, спостерігаємо значні деформації під час напружень, менших, ніж за сухого масиву на 12–15 МПа (рис. 4, 5). Такі деформації можуть впливати на робочий стан виробки. Отже, за 35–45 МПа навантаження моделі відбувається повна втрата робочого стану виробки (рис. 4). За 45 МПа навантаження максимальні напруження навколо виробки різко збільшуються – це зумовлено тим, що виробка втратила свою первісну форму, при цьому утворилися ділянки з гострими кутами, які є концентраторами напруження.

Зміна коефіцієнта концентрації напруження (рис. 6): для моделі з сухим масивом спостерігається тенденція нелінійного росту за навантаження 25 МПа, а потім зменшення концентрації напруження; для моделі з вологим масивом спостерігаються перепади концентрації напруження.

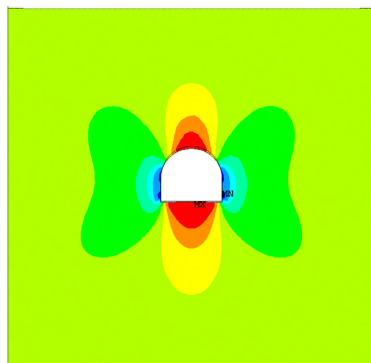
Ізолінії вертикальних напружень навколо виробки для різних умов навантаження та механічних властивостей порід.

Р, МПа

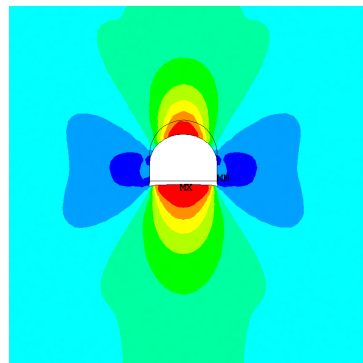
Сухий масив

Вологий масив

15 МПа

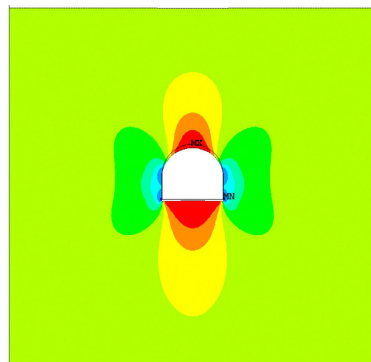


SY (AVG)  
RSYS=0  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
DMX =.247946  
SMN =-.368E+08  
SMX =-239741  
-.368E+08  
-.327E+08  
-.286E+08  
-.246E+08  
-.205E+08  
-.165E+08  
-.124E+08  
-.835E+07  
-.430E+07  
-239741

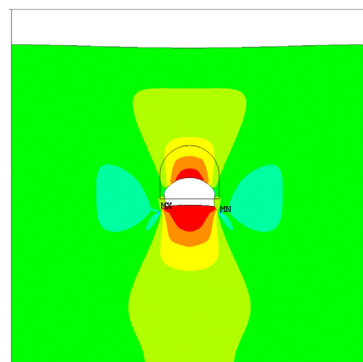


SY (AVG)  
RSYS=0  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
DMX =1.278  
SMN =-.223E+08  
SMX =-220173  
-.223E+08  
-.198E+08  
-.174E+08  
-.149E+08  
-.125E+08  
-.100E+08  
-.758E+07  
-.512E+07  
-.267E+07  
-220173

25 МПа

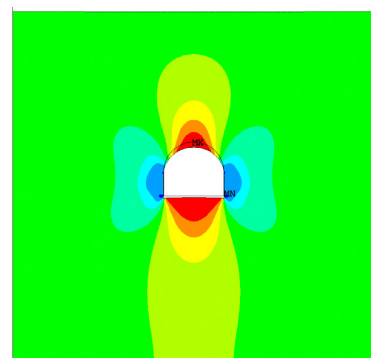


SY (AVG)  
RSYS=0  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
DMX =.413437  
SMN =-.662E+08  
SMX =-487512  
-.662E+08  
-.588E+08  
-.514E+08  
-.440E+08  
-.366E+08  
-.292E+08  
-.217E+08  
-.143E+08  
-.692E+07  
487512

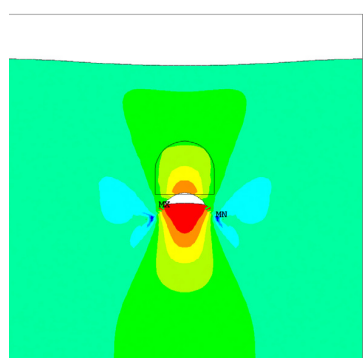


SY (AVG)  
RSYS=0  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
DMX =3.259  
SMN =-.543E+08  
SMX =637835  
-.543E+08  
-.482E+08  
-.421E+08  
-.360E+08  
-.299E+08  
-.238E+08  
-.177E+08  
-.116E+08  
-.547E+07  
637835

35 МПа

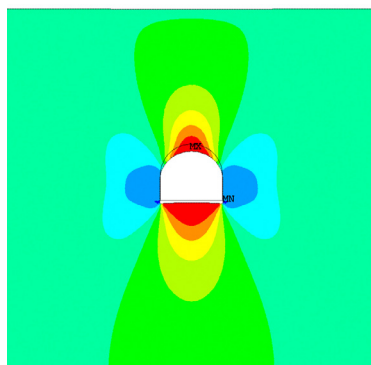


SY (AVG)  
RSYS=0  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
DMX =.581322  
SMN =-.743E+08  
SMX =710646  
-.743E+08  
-.660E+08  
-.576E+08  
-.493E+08  
-.410E+08  
-.326E+08  
-.243E+08  
-.160E+08  
-.763E+07  
710646

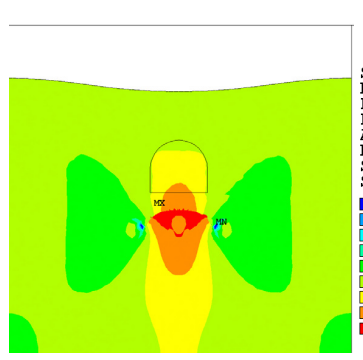


SY (AVG)  
RSYS=0  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
DMX =5.127  
SMN =-.627E+08  
SMX =135E+07  
-.627E+08  
-.556E+08  
-.485E+08  
-.414E+08  
-.342E+08  
-.271E+08  
-.200E+08  
-.129E+08  
-.577E+07  
135E+07

45 МПа



SY (AVG)  
RSYS=0  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
DMX =.760001  
SMN =-.815E+08  
SMX =101E+07  
-.815E+08  
-.723E+08  
-.631E+08  
-.540E+08  
-.448E+08  
-.356E+08  
-.265E+08  
-.173E+08  
-.815E+07  
101E+07



SY (AVG)  
RSYS=0  
PowerGraphics  
EFACET=1  
AVRES=Mat  
DMX =7.301  
SMN =-.123E+09  
SMX =.664E+07  
-.123E+09  
-.108E+09  
-.938E+08  
-.795E+08  
-.651E+08  
-.508E+08  
-.364E+08  
-.221E+08  
-.771E+07  
664E+07

Рис. 4. Ізолінії вертикальних напружень навколо виробки для різних умов навантаження та механічних властивостей порід

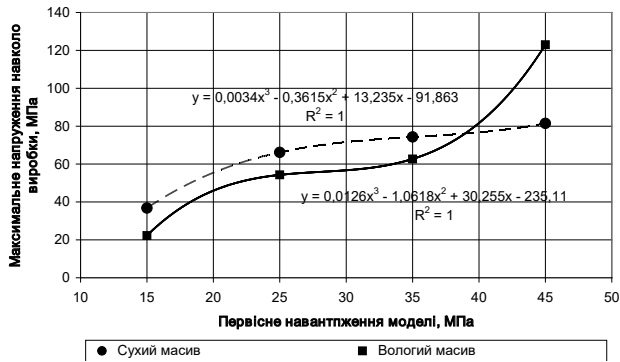


Рис. 5. Максимальне напруження навколо виробки для сухого і вологого масиву

Зона максимального опорного тиску для сухого масиву утворюється на контурі виробки, а для вологого масиву – вона має відстань від 1,5 м до 2,5 м до контуру виробки.

Зменшення корисної висоти виробки (рис. 7) для сухого масиву відбувається за лінійним законом, а для вологого – у вигляді поліному 3-го ступеня, де за навантаження 45 МПа вона дорівнює 0 м, тобто виробка «задавлена» (рис. 5).

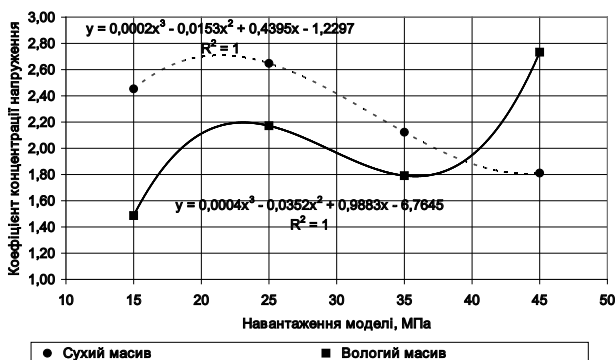


Рис. 6. Коефіцієнт концентрації вертикального напруження навколо виробки для сухого і вологого масиву

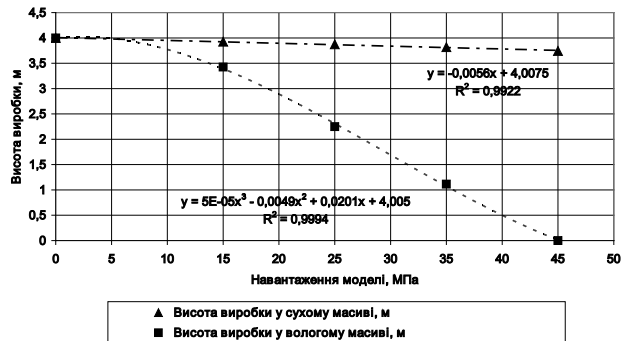


Рис. 7. Висота виробки для сухого і вологого масиву з урахуванням зсуву покрівлі та підосви

Отже, чисельне моделювання показало, яким чином на стан виробки впливають фізико-механічні властивості оточуючого масиву: де відбувається збільшення водопритоку у гірничі виробки, там змінюються механічні властивості порід, а саме це веде до втрати їх робочого стану.

**Висновки.** Таким чином, використання в'язко-пружних деформацій під час чисельного моделювання дає більш адекватні результати з визначення напружено-деформованого стану порід навколо гірничих виробок.

Зміна максимального напруження бічних порід (опорного тиску) сухого масиву відрізняється від максимального напруження бічних порід вологого масиву через вплив вологи на їх фізико-механічні властивості. Так, водопоширення у масиві змінює пружно-крихкі властивості порід на в'язко-пружні.

Отже, за зміни форми виробки у результаті дії пластичних деформацій також змінюється і коефіцієнт концентрації напруження. Пластичні деформації відбуваються поки є вільний простір для них, тому відбувається повне «здавлювання» виробки.

#### Список літератури:

1. Яланський А.О., Сапунова І.О., Слашов А.І., Новіков Л.А. Обґрунтування вихідних параметрів для моделювання геомеханічних процесів в задачах оцінки безпеки підтримання гірничих виробок. ISSN 1607-4556 (Print), ISSN 2309-6004 (Online) *Геотехнічна механіка*. 2014. № 119, с. 282–295.
2. Сукнів С.В. Определение статического модуля упругости и коэффициента Пуассона горных пород при изменении влажности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 7. – С. 108-116.
3. Jun Peng, Louis Ngai Yuen Wong, Guang Liu, Cee Ing Teh. Influence of initial micro-crack damage on strength and micro-cracking behavior of an intrusive crystalline rock/Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1317-3>.
4. Balázs Vásárhelyi, Morteza Davarpanah. Influence of Water Content on the Mechanical Parameters of the Intact Rock and Rock Mass/Periodica Polytechnica Civil Engineering, p. 1–6. URL: <https://doi.org/10.3311/PPci.12173>.
5. Ya.O. Liashok, O.I. Serhienko, V.M. Kutserubov, O.P. Kohtieva, L.V. Serhienko. The influence of the moisture on the physical and mechanical properties of the sandstone (Separate Unit “Kapitalna” coal mine”, Donbas)/ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2020 № 2, p. 11–17.

6. Zhang, Wang, Wang, Zhang, 2019. Experimental Study on Mechanics and Permeability Properties of Water-Bearing Raw Coal Samples Under In-Situ Stress. Applied Sciences. URL: doi:10.3390/app9122549.
7. Li, D., Sun, Z., Zhu, Q., Peng, K., 2019. Triaxial Loading and Unloading Tests on Dry and Saturated Sandstone Specimens. Applied Sciences. URL: doi:10.3390/app9081689.
8. Meyers and Chawla (1999): "Mechanical Behavior of Materials", 98–103.
9. McCrum, Buckley, and Bucknell (2003): "Principles of Polymer Engineering" p. 117–176.

**Serhienko O.I., Kohtieva O.P., Uvarov M.O. NUMERICAL MODELING OF VISCO-ELASTIC DEFORMATION OF A HOMOGENEOUS MASSIF AROUND OF A SINGLE WORKING SPACE**

*The article is considering the possibility to use of numerical simulations to investigate the stress-strain state of a homogeneous solid mass around a single working space with changes of the physical and mechanical properties of rocks, considering a visco-elastic deformation.*

*To determine the effect of moisture on the physical and mechanical properties of rocks, laboratory studies were performed with using sandstone samples from the mine "Capitalna" of the Donetsk coal basin.*

*Water saturation, in contrast to the dry state, as laboratory tests shown, leads to plastic deformation with a significant reduction in compressive strength. It was found that in the water-saturated state, the tensile strength and modulus of elasticity are decreased, and the coefficient of transverse deformations increased.*

*As a result of simulation shows that the zone of the maximum reference pressure for the dry massif is formed on the production contour and for the wet massif – it has a certain distance from the production contour by 1.5–2.5 m, it's depend on the stratification depth.*

*Under the action of pressure, a decrease in the useful height of production there is, for a dry massif according in linear fashion, and for a massif in the wet state the process is described as a polynomial of the degree 3. Stress on the model from 45 MP as is height of working space is equal to 0 m, that is the working space is "crushed".*

*The change in the maximum stress of the lateral rocks (reference pressure) of the dry massif differs from the maximum stress of the lateral rocks of the wet massif due to the influence of moisture on their physical and mechanical properties. Consequently, the water distribution in the massif changes the properties of elastic-brittle rocks to visco-elastic ones.*

*When the shape of the working space is change as a result of the action of plastic deformations, the stress concentration coefficient is also change. Plastic deformations are occurring while a free space for them there is, so a complete "squeezing" of the work-piece there is.*

*Therefore, by modeling with using visco-elastic deformations, more adequate results can be obtained to determine the stress-strain state of rocks around the working space.*

**Key words:** *physical-mechanical properties, stress-strain state, water-saturation of rocks, numerical simulation, viscous-plastic deformation.*



УДК 621.771.014.2

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/29>**Кухар В.В.**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Курпе О.Г.**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЧОРНОВОЇ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ

У роботі шляхом осадження в лабораторних умовах виконано дослідження властивості свинцевих зразків за умови ступеню деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од. За результатами експерименту визначено параметри зразків та розраховано значення істинного опору деформації. Виконано порівняльний аналіз властивостей та встановлено перелік марок сталі (сплаву) – аналогів, та умови (температура деформації 1200°C, швидкості деформації 1с<sup>-1</sup>, ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.), за яких вони є наближеними до властивостей свинцю. Отримано поліноміальні залежності істинного опору деформації від ступеня деформації для свинцю, а також для сплаву 0X18MФТ та марок сталі – аналогів 15X25T, DD11, 65Г, X80, X70, Ст3сп, з відповідною величиною вірогідності апроксимації від 0,992 до 0,998. Розраховано коефіцієнти пропорційності за допомогою яких результати подальших експериментів з прокатки свинцевих зразків можна перерахувати на відповідну марку сталі (сплав) – аналог. Виконано розширення можливостей для фізичного моделювання в межах температур від 1200°C до 1000°C, які відповідають більшості режимів обробки сучасних марок сталі при чорновій прокатці, шляхом введення коефіцієнту змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$  та розробки залежностей для розрахунку по кожній марці сталі (сплаву) – аналогу. Перевірку отриманих результатів виконано на фактичних даних по результатах чорнової прокатки товстих листів на стані 3600 МК «АЗОВСТАЛЬ» з кінцевими розмірами 17,5×3268×12200 мм зі сталі марки X70. При порівнянні фактичних даних з даними розрахованими на підставі отриманих коефіцієнтів пропорційності та коефіцієнтів змінення істинного опору деформації, середня похибка становить 11,6 %, що дозволяє використовувати отримані дані для подальшого фізичного моделювання процесів гарячої прокатки.

**Ключові слова:** фізичне моделювання, коефіцієнт пропорційності, істинний опір деформації, гаряча прокатка, марки сталі.

**Постановка проблеми.** Фізичне моделювання, як один із способів дослідження процесів прокатки дозволяє, в лабораторних умовах, отримати дані про процеси, які в реальних умовах поточного виробництва є неможливими, або потребують суттєвих витрат.

Серед таких трудомістких досліджень можна розглядати процеси, що відбуваються при чорновій гарячій прокатці сталі.

Важливим етапом, який супроводжує фізичне моделювання є дослідження, пов'язані з пошуком матеріалу-аналога, властивості якого, при певних умовах, повинні відображати властивості дослідної сталі. Цей етап є унікальним для кожного дослідження, так як враховує особливості та

умови процесу для якого буде застосовано результати фізичного моделювання.

Таким чином, фізичне моделювання складається з двох етапів, безпосереднього експерименту і обробки експериментальних даних та аналітичного етапу, який дозволяє встановити межі застосування для відповідного процесу обробки тиском.

Із розвитком нових технології та їх впровадженням на підприємствах, як наприклад термо-механічні процеси прокатки (ТМСП), фізичне моделювання, як інструмент дослідження та вдосконалення, набуває нового сенсу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Серед методів досліджень, які проводяться

для вивчення процесів прокатки, наразі найбільш розповсюдженими є аналітичні методи [1–4] та методи математичного моделювання [5–10], які отримали своє поширення з розвитком комп'ютерних технологій. Однак лабораторні дослідження з фізичного моделювання, як приклад, дослідження процесів на лабораторній моделі стану Стеккеля [11], сучасних комплексів імітації технологічних процесів [12], та окремих процесів плоскої гарячої прокатки [13] дозволяють наблизити експерименти до реальних умов промислового виробництва та суттєво поглибити знання щодо покращення процесів засвоєння технології. Поєднання процесів фізичного моделювання з сучасними можливостями інформаційної обробки результатів суттєво розширює межу їх застосування та дозволяють отримати результати на новому якісному рівні.

Таким чином, дослідження процесів прокатки, у тому числі сучасних технологічних процесів, таких як термомеханічна прокатка, шляхом фізичного моделювання з використанням сучасних можливостей обробки інформації за допомогою комп'ютерної техніки є актуальним завданням.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є пошук умов та марок сталі, в тому числі тих, які виробляються способом термомеханічної прокатки, властивостям яких відповідає свинець як матеріал-аналог, для використання його в подальшому фізичному моделюванні.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Дослідження проводилося через стиснення свинцевих зразків на гідравлічному пресі моделі ПММ-125, максимальною силою 1,23 МН, швидкістю ходу штоку 2 мм/с.

При випробуваннях на стиснення використовувались 9 зразків циліндричної форми. Виконуючи по черзі осаджування зразків, за 5 підходів, до кінцевої висоти  $H_k = 19,5$  мм, контактні поверхні яких були попередньо змащені індустріальною оливою марки И-20А, фіксували силу стиснення  $P$ , Н. Температура випробувань  $20 \pm 8^\circ\text{C}$ , ступінь деформації 0,1–0,54 відн. од., швидкість деформації  $1\text{с}^{-1}$ .

Для визначення коефіцієнту тертя  $f$  між контактними поверхнями, два циліндричних свинцевих зразка з діаметром  $D_0 = 19,5$  мм та висотою  $H_0 = 20,3$  мм додатково осаджували до кінцевої висоти  $H_k = 14,5$  мм, також фіксувалася сила стиснення  $P$ , Н. Для кожного зразка визначали середню силу стиснення  $P_x$ .

Параметри зразків, по результатах експерименту, визначали по методології [14]. Дійсний опір деформації визначали по формулі С.І. Губкіна, Е. Зибеля [14]:

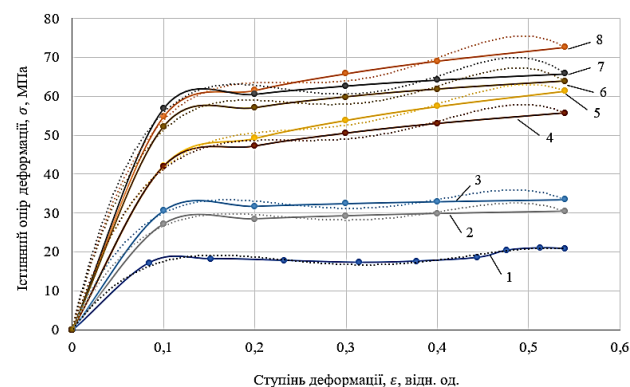
$$\sigma = \frac{q}{1 + \left[ \frac{1}{3} f (d/h) \right]}, \quad (1)$$

де  $q$  – середній тиск, Н;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $d, h$  – поточні діаметр та висота зразка, мм.

Результати розрахунку дійсного опору деформації свинцю по формулі (1) наведені на рис. 1.

Для порівняння аналогів, вибрані марки сталі які є більш наближені, по своїх властивостях, при відповідних умовах (температура деформації  $1200^\circ\text{C}$ , швидкість деформації  $u = 1\text{с}^{-1}$ , ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.) до властивостей свинцю, рис. 1. Дані умови є наближеними до режимів, які є на перших проходах чорнової гарячої прокатки.

Розрахунок істинного опору деформації для сплаву 0Х18МТФ та марок сталі СтЗсп, 15Х25Т, 65Г виконували по методиці Л. В. Андреюка, Г. Г. Тюленева [15], для марки сталі DD11 по методиці Л. В. Андреюка, Г. Г. Тюленева (по хімічному складу) [15], для марок сталі Х70 та Х80 – по розробках [16] та [17] відповідно.



**Рис. 1. Порівняння кривих зміцнення свинцю при температурі  $20^\circ\text{C}$  (1) та марок сталі (сплаву)-аналогів 0Х18МТФ (2), 15Х25Т (3), DD11 (4), 65Г (5), Х80 (6), Х70 (7), СтЗсп (8) при температурі  $1200^\circ\text{C}$ , пунктиром вказані лінії тренду**

На підставі рис. 1 отримано поліноміальні залежності істинного опору деформації від ступеня деформації для свинцю, а також для марок сталі (сплаву)-аналогів, з відповідною величиною вірогідності апроксимації  $R^2$ . Залежність істинного опору деформації свинцю, сплаву 0Х18МТФ, марок сталі 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, СтЗсп від ступеня деформації  $x$ , мають наступний вигляд:

$$\sigma_{pb} = -3059,9x^4 + 4073,8x^3 - 1832x^2 + 321,82x - 0,1057; R^2 = 0,992. \quad (2)$$

$$\sigma_{X18MФТ} = -4696x^4 + 6004,8x^3 - 2647,8x^2 + 474,28x + 0,1175; R^2 = 0,996. \quad (3)$$

$$\sigma_{15X25T} = -5378,2x^4 + 6870,1x^3 - 3022,6x^2 + 537,27x + 0,1351; R^2 = 0,996. \quad (4)$$

$$\sigma_{DD11} = -6445,7x^4 + 8308,4x^3 - 3722,3x^2 + 706,37x + 0,1572; R^2 = 0,998. \quad (5)$$

$$\sigma_{65Г} = -6026x^4 + 7796,2x^3 - 3529,2x^2 + 694,54x + 0,1448; R^2 = 0,998. \quad (6)$$

$$\sigma_{X80} = -8385x^4 + 10783x^3 - 4811,5x^2 + 891,99x + 0,2053; R^2 = 0,997. \quad (7)$$

$$\sigma_{X70} = -9558,6x^4 + 12251x^3 - 5427,5x^2 + 984,91x + 0,2371; R^2 = 0,996. \quad (8)$$

$$\sigma_{Ст3сп} = -8411,1x^4 + 10835x^3 - 4857x^2 + 921,64x + 0,2051; R^2 = 0,998. \quad (9)$$

Результати оцінки відхилень в розрахунках по отриманих залежностях (2)-(9) в порівнянні з розрахунком істинного опору деформації по вихідних методиках [15, 16, 17], та по формулі (1) для свинцю, наведені в табл. 1.

Таким чином, можна побачити збільшення як максимальних відхилень так і середнього відхилення в міру віддалення або «зниження» ступеню аналогічності (100-відхилення, %) матеріалу від свинцю.

Для поширення результатів експерименту, як інструменту для фізичного моделювання процесів прокатки, для марок сталі (сплаву)-аналогів розраховано коефіцієнти пропорційності:

$$n_i = \frac{a_{i \text{ аналог}}}{a_{i \text{ pb}}}, \quad (10)$$

де  $a_{i \text{ pb}}$  – відповідний коефіцієнт регресії в залежності істинного опору деформації свинцю від ступеня деформації;  $a_{i \text{ аналог}}$  – відповідний коефіцієнт регресії в залежності істинного опору деформації марки сталі (сплаву)-аналогу від ступеня деформації.

Результати розрахунку коефіцієнтів пропорційності наведено в табл. 2.

За допомогою отриманих коефіцієнтів пропорційності, результати подальших експериментів з прокатки свинцевих зразків можна перерахувати на відповідну марку сталі (сплаву)-аналог для наступних умов: температура деформації 1200°C, швидкість деформації  $\dot{\epsilon} = 1 \text{ с}^{-1}$ , ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.

Слід зазначити що більшість сучасних марок сталі, при чорновій прокатці, обробляються при

Таблиця 1

**Оцінки відхилень в розрахунках істинного опору деформації свинцю та марок сталі (сплаву)-аналогів**

Відхилення, %	Матеріал / нормативний документ							
	Свинець ССу / ГОСТ 1292	0X18MФТ / спецсплав	15X25T / ГОСТ 5632	DD11 / EN10111	65Г / ГОСТ 14959	X80 / API- 5L	X70 / API-5L	Ст3сп / ДСТУ 2651
мін	-5,15	-3,93	-4,04	-3,26	1,80	-1,73	-3,14	-0,21
мах	5,29	3,62	3,77	2,54	9,91	9,46	9,31	9,65
середнє	0,20	0,10	0,12	-0,38	6,46	4,04	3,28	5,20

Таблиця 2

**Розраховані коефіцієнти пропорційності для марок сталі (сплавів)-аналогів**

Марка сталі (сплаву)-аналога	Коефіцієнт пропорційності $n_i$ , для відповідного коефіцієнту поліному				
	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0X18MФТ	1,535	1,474	1,445	1,474	-1,112
15X25T	1,758	1,686	1,650	1,669	-1,278
DD11	2,107	2,039	2,032	2,195	-1,487
65Г	1,969	1,914	1,926	2,158	-1,370
X80	2,740	2,647	2,626	2,772	-1,942
X70	3,124	3,007	2,963	3,060	-2,243
Ст3сп	2,749	2,660	2,651	2,864	-1,940

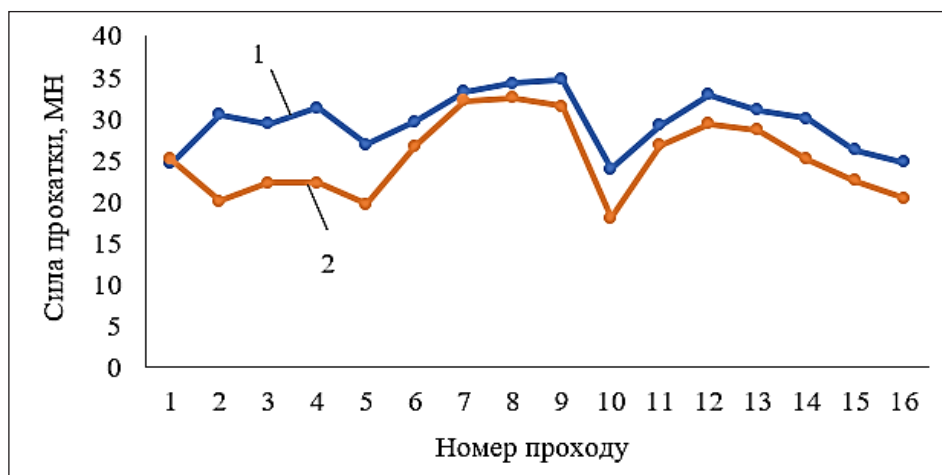


Рис. 2. Порівняння фактичної сили (1) отриманої при чорновій прокатці товстих листів з кінцевими розмірами 17,5×3268×12200 мм, зі сталі марки Х70 та розрахованої (2)

температурах 1200-1000°C, в тому числі марки що виробляються способом ТМСП. З метою розширення можливостей для фізичного моделювання виконано додаткові розрахунки істинного опору деформації марок сталі (сплаву)-аналогів при температурах від 1200°C до 1000°C зі ступенем деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.

Для встановлення залежностей впливу змінення температури на істинний опір деформації з врахуванням ступеню деформації, по кожній з досліджених марок сталі (сплаву)-аналогів розраховано коефіцієнти змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$ . В якості базового прийнято істинний опір деформації при температурі  $t=1200^\circ\text{C}$ , для кожного ступеня деформації.

Ідентичність розрахованих коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$  в залежності від температури  $t$ , для різних ступенів деформації дозволило встановити залежності впливу змінення температури на істинний опір деформації для кожній з дослідних марок сталі (сплаву)-аналогів та отримати відповідні рівняння:

$$\text{для сплаву 0X18MTФ } K_\sigma = 2 \times 10^{11} \times t^{-3,64}; R^2 = 1. \quad (11)$$

$$\text{для сталі марки 15X25T } K_\sigma = 2 \times 10^{11} \times t^{-3,7}; R^2 = 1. \quad (12)$$

$$\text{для сталі марки DD11 } K_\sigma = 2 \times 10^{10} \times t^{-3,33}; R^2 = 1. \quad (13)$$

$$\text{для сталі марки 65Г } K_\sigma = 2 \times 10^9 \times t^{-3,02}; R^2 = 1. \quad (14)$$

$$\text{для сталі марки Х80 } K_\sigma = 3 \times 10^{11} \times t^{-3,703}; R^2 = 0,999. \quad (15)$$

$$\text{для сталі марки Х70 } K_\sigma = 6 \times 10^8 \times t^{-2,852}; R^2 = 0,9993. \quad (16)$$

$$\text{для сталі марки Ст3сп } K_\sigma = 7 \times 10^7 \times t^{-2,54}; R^2 = 1. \quad (17)$$

в рівняннях (11)-(17) —  $t$  — температура деформації, °C;  $R^2$  — величина вірогідності апроксимації

Таким чином, використання отриманих коефіцієнтів пропорційності, табл. 2, сумісно з рівняннями (11)-(17) дозволяє моделювати процеси прокатки та перераховувати результати експериментів зі свинцем на сплав 0X18МФТ та марки сталі 15X25T, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп при наступних умовах: температура деформації 1200-1000°C, швидкість деформації  $\dot{\epsilon} = 1\text{с}^{-1}$ , ступінь деформації 0,1-0,54 відн. од.

З метою перевірки якості отриманих результатів, для застосування при подальшому фізичному моделюванні, виконано порівняння з фактичними даними по параметрах прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ».

Для перевірки використано дані чорнової прокатки товстих листів з кінцевими розмірами 17,5×3268×12200 мм зі сталі марки Х70, плавка №1302503, партія 9063, з розмірами слябу в холодному стані 300×1850×3003 мм.

Залежність, яка була використана для розрахунку істинного опору деформації, враховує відповідні значення  $n_i$  та  $K_\sigma$ , має наступний вигляд:

$$\sigma_{pb} = \left( \begin{matrix} -3059,9 \times 3,124x^4 + 4073,8 \times 3,007x^3 - \\ -1832 \times 2,963x^2 + 321,82 \times 3,060x - \\ -0,1057 \times (-2,243) \end{matrix} \right) \times 6 \times 10^8 \times t^{-2,852}. \quad (18)$$

На підставі залежності (18) розрахована сила прокатки по відомій методиці [18], порівняння якої з фактичною силою прокатки наведено на рис. 2. Прокатка здійснювалась в діапазоні температур 1126-1028°C.

Підвищена розбіжність між фактичними та розрахованими даними, рис. 2, спостерігається у 2-5 проходах, в яких безпосередньо здійснювалась розбивка розкату по ширині, та яка може



бути пов'язана з нерівномірним нагріванням або переохолодженням торців слябів.

Загальна середня похибка по всіх проходах становить 14,9 %. Якщо не враховувати вплив розбивки розкату по ширині у 2-5 проходах, тоді середня похибка становить 11,6 %, що є задовільним рівнем.

**Висновки.** З метою дослідження силових процесів прокатки методами фізичного моделювання, шляхом проведення лабораторних досліджень, отримано графіки кривих зміцнення свинцю, визначено перелік марок сталі (сплав)-аналогів 0X18MTФ, 15X25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, СтЗсп, які є найбільш наближеними до свинцю.

Уперше отримано залежності для розрахунку коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$ , які в комплексі з розрахованими коефіцієнтами пропорційності  $n_i$ , дозволяють поширити результати фізичного моделювання свинцю на марки сталі (сплав)-аналоги при наступних умовах - температурі деформації 1000-1200°C, ступінь деформації 0,1-0,54 відн. од., швидкості деформації  $u = 1\text{с}^{-1}$ .

Отриманий комплекс залежностей перевірено на фактичних даних прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», середня похибка не перевищує 11,6 %.

### Список літератури:

1. Kim J., Lee J., Hwang S. M. An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling. *International journal of heat mass transfer*. 2009. Vol. 52. P. 1864–1874.
2. Improvement of Process Parameters Calculation for Coil Rolling at the Steckel Mill / O. H. Kurpe, V. V. Kukhar, E. S. Klimov, S. M. Chernenko. *Materials Science and Metallurgical Technology II*. Materials Science Forum. 2020. Vol. 989. P. 609–614.
3. Курпе О.Г., Кухар В.В. Розширення сортаменту листового прокату в умовах металургійного заводу в Італії. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки*. 2018. № 3, т. 29(68). С. 121–126.
4. Kurpe O.H., Kukhar V.V. Development and Optimization of Flat Products Manufacturing at Rolling Mill 3200. *Materials Science and Metallurgical Technology*. Materials Science Forum. 2018. Vol. 946. P. 794–799.
5. Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels / Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, Guodong Wang. *Journal of University of Science and Technology*. Beijing. 2008. Vol. 15. P. 396–401. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4).
6. Schausberger F., Steinboeck A., Kugi A. Mathematical modeling of the contour evolution of heavy plates in hot rolling. *Applied Mathematical Modelling*. 2015. Vol. 39. P. 4534–4547. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.017>.
7. A mathematical model and two-stage heuristic for hot rolling scheduling in compact strip production / Quan-Ke Pan, Qing-da Chen, Tao Meng, Bing Wang, Liang Gao. *Applied Mathematical Modelling*. 2017. Vol. 48. P. 516–533. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.03.067>.
8. Rudkins N., Evans P. Mathematical modelling of mill set-up in hot strip rolling of high strength steels. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998. Vol. 80–81. P. 320–324. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00190-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00190-3).
9. Mathematical Model and Stability Analysis of the Lateral Plate Motion in a Reversing Rolling Mill Stand / Andreas Ettl, Katharina Prinz, Martin Mueller, Andreas Steinboeck, Andreas Kugi. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51, № 2. P. 73–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.013>.
10. Phaniraj M. P., Behera B. B., Lahiri A. K. Thermo-mechanical modeling of two phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill Part I. Prediction of rolling loads and finish rolling temperature. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 170. P. 323–335.
11. Hinton John S., Beynon John H. A Laboratory Steckel Mill Simulation. *Steel research international*. 2008. Vol. 79, № 4. P. 278–286. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.200806352>.
12. Частухин А.В. Закономерности процессов рекристаллизации аустенита и совершенствование технологии контролируемой прокатки микрولهгированных трубных сталей повышенной хладостойкости : дис. на соискание уч. степени к-та т. наук : 05.16.01 / ФГУП ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина. Москва, 2017. 171 с.
13. Lenard John. G. Primer on Flat Rolling. *Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process*. Elsevier Ltd. 2007. Chapter 3. P. 36–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008045319-4/50005-X>.
14. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. Москва : Металлургия, 1976. 486 с.
15. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки : Справочник. Москва : Металлургия, 1986. 430 с.
16. Капланов В.И., Курпе А.Г. Усовершенствованная зависимость для определения пластических свойств стали категории прочности Х70. *Университетская наука – 2009* : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Мариуполь : ПГТУ, 2009. С. 156–157.

17. Курпе А.Г. Моделирование технологического процесса прокатки толстых листов на стане 3600 ОАО «МК «Азовсталь» : автореф. дис. на соискание учен. Степени к-та т. наук : 05.16.05. Мариуполь, 2006. 23 с.
18. Старченко Д.И. Динамика продольной прокатки : учебное пособие. Киев : ИСНО, 1994. 400 с.

**Kukhar V.V., Kurpe O.H. PHYSICAL SIMULATION OF THE HOT ROUGHING ROLLING POWER PROCESSES**

*In the paper, by upsetting, in laboratory conditions, the properties of lead samples have studied at a degree of deformation from 0.1 relative units to 0.54 relative units. According to the results of the experiment, the parameters of the samples have been determined, and the true strain resistance has been calculated. Comparative analysis of properties has been made and the list of steel grades (alloy) – analogues and conditions (deformation temperature 1200°C, deformation rates  $u = 1 \text{ s}^{-1}$ , deformation degree from 0.1 relative units to 0.54 relative units) under which they are close to the properties of lead has been determined. The polynomial dependences of true strain resistance on the degree of deformation for lead, as well as for alloy 0X18MFT and steel grades – analogues 15X25T, DD11, 65G, X80, X70, St3sp, with corresponding magnitude of approximation probability from 0.992 to 0.998 have been obtained. The proportionality coefficients have been calculated by which the results of further experiments on rolling lead samples can be converted to the corresponding steel grade (alloy) – analogue. Expansion of possibilities for physical modeling has been performed within the temperature range from 1200°C to 1000°C, which corresponds to most modes of processing of modern steel grades during roughing rolling, by introducing the coefficient of change of the true deformation resistance  $K_\sigma$  and developing dependences for calculation for each steel grade (alloy) – analogue. The verification of the obtained results has been performed based on the actual data of the thick plates roughing rolling results on the mill 3600 AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS with final dimensions of  $17.5 \times 3268 \times 12200 \text{ mm}$  of steel grade X70. When comparing the actual data with the data calculated on the basis of the obtained proportionality coefficients and the coefficients of change of the true deformation resistance, the average error is 11.6 %, which allows to use the obtained data for further physical modeling of hot rolling processes.*

**Key words:** physical modeling, proportionality coefficients, true strain resistance, hot rolling, steel grades.

УДК 331.482-047.37:621.771

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/30>**Тарасов В.К.**

Запорізький національний університет

**Воденнікова О.С.**

Запорізький національний університет

**Куріс Ю.В.**

Запорізький національний університет

**Матяшева Ю.Б.**

Запорізький металургійний коледж

Запорізького національного університету

**Воденнікова Л.В.**

Запорізький державний медичний університет

**Бабошко Д.Ю.**

Криворізький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХОДІВ ЩОДО ПОЛІПШЕННЯ УМОВ ПРАЦІ В ЦЕХАХ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ

Проаналізовано шкідливі й небезпечні чинники, що виникають у прокатному виробництві, зокрема в процесі холодної прокатки сталевих листів. Для умов цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» виявлено перевищення допустимих норм концентрації парів кислот у травильному відділенні (до двох разів), концентрації парів мастил (в 1,84 разу) та рівня виробничого шуму в прокатних відділеннях (на 23 дБА). Проведено оцінку раціонального засобу захисту робочої зони від дії надмірного шуму в цехах холодної прокатки й показано зменшення площі зони з 297,91 м<sup>2</sup> до 9,81 м<sup>2</sup> і рівня шуму на 21,7 дБ, що суттєво зменшує шумове забруднення виробничого середовища. З метою оздоровлення робочої зони цеху холодної прокатки запропоновано використовувати як місцеву вентиляцію, так і часткову аерацію. Для видалення парів технологічного мастила в міжклітьових проміжках безперервного стану й за останньою кліткою запропоновано встановлювати витяжні зонти. Вентиляційна система безперервного листового стану холодної прокату сприяє збільшенню кратності повітряобміну в межах 10–25. Приділено увагу дослідженню ефективності системи вловлювання парів мастильно-охолоджувальних рідин з використанням двоступеневого тумановловлювача, перший ступінь якого складається з тонких волокон, а другий – з сітчастого бризковловлювача, який слугує для уловлювання збільшених рідких частинок. Проаналізована ефективність очищення повітря від крапель у сітчастому фільтрі залежно від товщини пакета фільтрів, кількості сіток у пакеті й ефективності очищення парів однією сіткою. Показана доцільність використання пакета з 6–10 сіток сумарна товщина якого становить 0,01–0,012 м, причому використання більшої товщини пакета небажано внаслідок значного підвищення енерговитрат на очищення парів. Індивідуальна ефективність однієї сітки найбільше впливає на загальну ефективність тумановловлювача. Тобто за ефективності сітки 0,92–0,96 корисна дія всього фільтра становить 99,819–99,998%. Запропоновано для умов цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» використання картриджного фільтра типу NOM 112 на основі нановолоконної технології для вловлення особливо шкідливих субмікронних часток до 0,5 мкм, що забезпечують надзвичайно високу ефективність очищення (до 99,999%).

**Ключові слова:** умови праці, фактори виробничого середовища, холодна прокатка, пари мастил, уловлювання.

**Постановка проблеми.** На сьогодні на металургійних підприємствах системи захисту від факторів виробничого середовища не завжди забезпечують санітарні вимоги до умов праці, які визначаються технологією виробничого процесу

й санітарно-гігієнічною обстановкою, що створюється на робочих місцях. Підтримання допустимих умов праці в прокатному виробництві, а зокрема в цехах холодної прокатки (ЦХП), може бути досягнуте шляхом дослідження величини й рівня шкід-

ливих чинників у робочій зоні безперервного прокатного стану й розроблення раціональних засобів захисту від шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища [1, 2].

Саме тому виникає потреба в проведенні досліджень ефективності сучасних систем шумозахисту й уловлювання парів мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) та розробленні раціональних засобів захисту від шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища, що своєю чергою є актуальним і важливим науково-технічним завданням з точки зору охорони праці й поліпшення екологічної безпеки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [3] представлені дані про розподіл виробничих ризиків і найбільш небезпечні умови праці в галузі вугільної промисловості. Це дає можливість виділити найбільш небезпечні операції виробництва в цій галузі, сконцентрувати на них дослідження з метою розроблення заходів для зменшення травматизму на робочих місцях.

Авторами роботи [4] детально визначено проблеми безпеки праці в промисловості й запропоновано аналітичний підхід для оцінки рівня безпеки на робочих місцях.

В роботі [5] проведено дослідження професійного ризику робітників металургійних підприємств і враховано гігієнічну оцінку умов праці виробничого середовища.

Аналізу причин забруднення робочого середовища й визначенню джерела шкідливих і небезпечних викидів у доменному виробництві присвячена робота [6]. Автори виконали пошук раціональних заходів щодо підвищення ефективності роботи аспіраційної системи ливарного двору доменної печі для видалення шкідливих газів, пилу й тепла.

В роботі [7] представлена методика аналітичної оцінки умов праці з урахуванням окремих елементів технології й визначенням інтегральної суми балів. Така методика є багатofункціональною й може бути корисною для різних умов промисловості.

Вплив мастильно-охолоджувальних рідин на здоров'я людини й навколишнє середовище розглянуто в роботі [8]. Визначено особливості різних складів сумішей, що дає змогу визначити найменш шкідливі для людини.

Обґрунтування впливу шкідливих чинників на здоров'я людини приведено в роботі [9]. Запропоновано новий метод і програму визначення екологічного ризику на прикладі території промислової області.

**Постановка завдання.** Мета роботи – розроблення системи заходів захисту від небезпечних і шкідливих факторів у цехах холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь».

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати вплив небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища в цехах холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь»;
- провести оцінку раціонального засобу захисту робочої зони від дії надмірного шуму в цехах холодної прокатки;
- проаналізувати ефективність системи вловлювання парів мастил залежно від товщини пакета фільтрів, кількості сіток у пакеті й ефективності очищення парів однією сіткою;
- для умов виробничого середовища запропонувати комплексну систему очищення парів від крапель мастил різного розміру.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Аналіз карти умов праці в цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» показав, що працівники можуть піддаватися впливу таких небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища, як-от:

- запиленість (фактична концентрація пилу  $19,4 \text{ мг/м}^3$ , тоді як допустима концентрація становить  $4 \text{ мг/м}^3$ );
- пари кислот у травильному відділенні (перевищення концентрації до двох разів);
- підвищена температура в зоні відпалу в колакових печах ( $28^\circ\text{C}$  при нормі  $15\text{--}26^\circ\text{C}$ );
- пари мастил ( $9,2 \text{ мг/м}^3$  при нормі  $5 \text{ мг/м}^3$ );
- високий рівень загальної вібрації ( $121 \text{ дБ}$  при нормі  $109 \text{ дБ}$ );
- високий рівень виробничого шуму в прокатних відділеннях ( $103 \text{ дБА}$  при нормі  $80 \text{ дБА}$ ).

Для зменшення площі небезпечної зони від дії шуму (рис. 1) та зниження рівня звукового тиску в цехах холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» доцільно встановити акустичний екран зі сталевих листів завтовшки 2 мм з шумопоглиначем з мінеральної вати. Екран встановлюється на відстані 2,5 м від джерела шуму. Аналіз проведених розрахунків площі небезпечної зони від дії шуму й місця показав на скорочення площі зони з  $297,91$  до  $9,81 \text{ м}^2$  та зниження рівня шуму на  $21,7 \text{ дБ}$ , що суттєво зменшує шумове забруднення виробничого середовища.

Вібрація від обладнання в ЦХП має характер коливань: стаціонарних випадкових (з основною частотою від 4 до 8 Гц) і ударного типу (від 2 до 5 поштовхів за секунду, тривалістю  $0,05\text{--}0,3 \text{ с}$ ). Для



зниження рівня вібрації запропоновано використовувати інструмент з антивібраційним покриттям контактної поверхні й спеціальні захисні рукавиці.

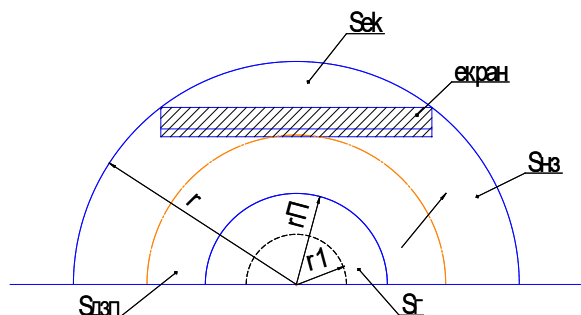


Рис. 1. Схема до розрахунку площі небезпечної зони від дії шуму:

$S_{\text{нз}}$  – площа небезпечної зони;  $S_{\text{екр}}$  – площа зони, що обмежена екраном;  $S_{\text{г}}$  – площа зони, де необхідно використовувати індивідуальні засоби захисту;  $S_{\text{дзп}}$  – допустима зона праці після встановлення екрана;  $r_1$  – рівень шуму на відстані 1 м від джерела шуму;  $r$  – радіус зони, де може працювати тільки персонал стану

В ЦХП працівники можуть піддаватися також впливу парів мастил у прокатних відділеннях. Основною причиною виділення парів є мастильно-охолоджувальні рідини, які знижують коефіцієнт тертя під час прокатки смуг і листів, сприяють зменшенню зносу валків і налипанню металу на валки, запобіганню задирам смуг і листів, формуванню допустимої мікрогеометрії поверхні продукції, очищенню поверхні листів від забруднень. Дуже важливим фактором також є відведення тепла з осередку деформації й регулювання теплового обміну валків. МОР повинні відповідати певним вимогам: бути стабільними в експлуатації й під час зберігання, зручними в подаванні на смугу й валки, піддаватися регенерації й не чинити шкідливого впливу на навколишнє середовище.

У цеху холодної прокатки першою точкою нанесення технологічного мастила є безперервно-травильний агрегат для запобігання корозії металу під час зберігання протруєних рулонів перед холодною прокаткою, а також для захисту смуг від подряпин і задирав під час змотування смуг у рулон після травлення.

З метою оздоровлення робочої зони цеху холодної прокатки застосовують як місцеву вентиляцію, так і часткову аерацію. Для видалення парів технологічного мастила в міжкліткових проміжках безперервного стану й за останньою кліткою встановлюють витяжні зонти (рис. 2). Застосування вентиляційної системи безперервного листового

стану холодного прокату сприяє збільшенню кратності повітряобміну в межах 10–25.

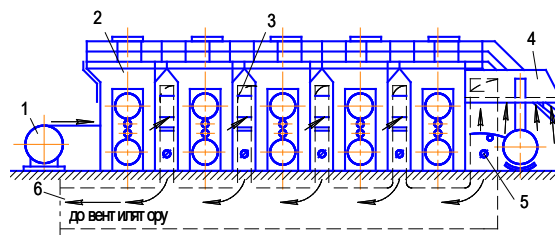


Рис. 2. Вентиляційна система безперервного листового стану холодного прокату:  
1 – розмотувач; 2 – робочі клітки; 3 – витяжні зонти в міжкліткових проміжках; 4 – витяжний зонтик над моталкою; 5 – вентилятори; 6 – повітропровід

Однак не завжди можливо повністю вловити шкідливі речовини місцевими відсмоктувачами. У цих випадках невлоне забруднене повітря розбавляють припливним повітрям до допустимих концентрацій. Вихідною величиною для визначення повітрообміну в разі влаштування загальної обмінної вентиляції в прокатних цехах є кількість шкідливих виділень у вигляді тепла й парів мастил, які встановлюються на підставі використання виробничих вимірів обсягів шкідливих викидів. Неорганізовані викиди видаляються природним шляхом через аераційні ліхтарі на дахах виробничих будівель. Це призводить до забруднення навколишнього середовища й істотних втрат дорогих мастил. Для підвищення ефективності вловлювання мастил вважається за необхідне проведення раціонального вибору тумановловлювачів.

Найбільший ефект відділення крапель туману досягається на двоступеневих тумановловлювачах (рис. 3), у яких перший ступінь складається з тонких волокон, а другий – з сітчастого бризковловлювача, який слугує для вловлювання збільшених рідких частинок.

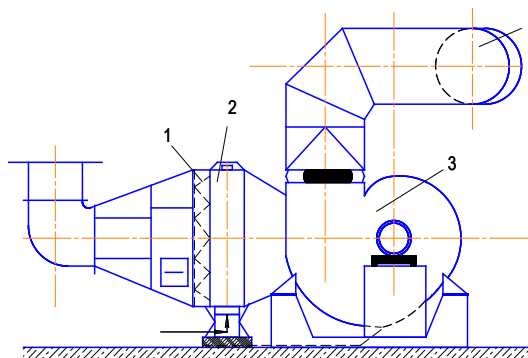


Рис. 3. Двоступеневий тумановловлювач:  
1 – волокнистий фільтр; 2 – сітчастий фільтр;  
3 – вентилятор; 4 – трубопровід видалення очищеного повітря

Для розрахунку першого ступеня необхідно визначити площу фільтрації:

$$F = \frac{Q}{(3600 \cdot W)}, \quad (1)$$

де  $Q$  – обсяг газу, що надходить на очистку, який дорівнює  $10000 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $W$  – швидкість фільтрації, яка дорівнює  $2,8 \text{ м/с}$ .

Для розрахунку другого ступеня необхідно визначити оптимальну швидкість фільтрації:

$$W = 0,107 \cdot \sqrt{\frac{(\rho_m - \rho_n)}{\rho_n}}, \quad (2)$$

де  $\rho_m$  – щільність масла, яка дорівнює  $900 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_n$  – щільність повітря, яка дорівнює  $1,3 \text{ кг/м}^3$ .

Ефективність очищення повітря від крапель в сітчастому фільтрі становить:

$$\eta = 1 - \left( 1 - \left( 0,2 \cdot H \cdot S_{num} / N \cdot \eta_i \right) \right)^N, \quad (3)$$

де  $H$  – товщина фільтрувального пакета, м;  $S_{num}$  – питома поверхня дротів у пакеті сіток,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $N$  – число сіток в пакеті, шт.;  $\eta_i$  – ефективність очищення повітря від крапель однією сіткою.

$$S_{num} = 4 \cdot \frac{1 - n}{\lambda_{np}}, \quad (4)$$

де  $n$  – пористість пакета сіток, яка дорівнює  $0,9$ ;  $\lambda_{np}$  – діаметр дроту сітки, який дорівнює  $200 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

Встановлено, що за початкової концентрації масла в робочій зоні  $50 \text{ мг/м}^3$  концентрація після очищення дорівнює  $0,9 \text{ мг/м}^3$ , що нижче гранично допустимої величини для цього приміщення, яка дорівнює  $5 \text{ мг/м}^3$ . Потужність двигуна вентилятора, необхідна для транспортування туману через апарат очистки, становить:

$$N = \frac{(k \cdot Q \cdot \Delta P)}{(3600 \cdot 1000 \cdot \eta_m \cdot \eta_p)}, \quad (5)$$

де  $k$  – коефіцієнт запасу потужності, який перебуває в межах від  $1,1$  до  $1,5$ ;  $Q$  – обсяг газу, що надходить на очистку,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\Delta P$  – гідравлічний опір,  $\text{кг/см}^2$  (Па);  $\eta_m$  – коефіцієнт корисної дії втрат енергії на тертя механізмів, який перебуває в межах від  $0,7$  до  $0,9$ ;  $\eta_p$  – коефіцієнт опору рідини МОР, який перебуває в межах від  $0,9$  до  $0,95$ .

Варіюючи значеннями товщини пакета (від  $0,01 \text{ м}$  до  $0,018 \text{ м}$ ), кількістю сіток в пакеті (від  $6$  до  $16$  шт.) й ефективністю очищення повітря від крапель однією сіткою (від  $0,9$  до  $0,98$ ) від-

повідно до формули (3), отримуємо ефективність очищення повітря від крапель у фільтрі (рис. 4–6).

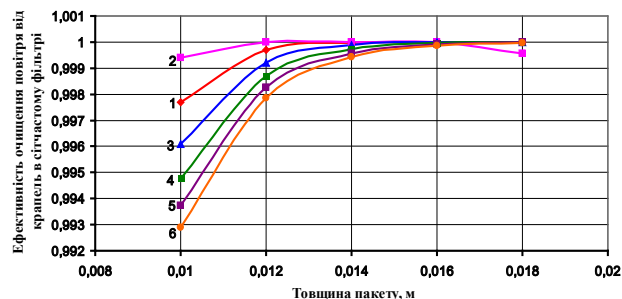


Рис. 4. Залежність ефективності очищення повітря від крапель у сітчастому фільтрі від товщини пакета: 1–6 – за кількості сіток у пакеті 6, 8, 10, 12, 14 і 16 шт. відповідно

Дані рис. 4 показують, що залежності ефективності очищення повітря від парів мастила від товщини пакета має експонентний характер. Простежується доцільність використання пакета з 6–10 сіток із сумарною товщиною  $0,01$ – $0,012 \text{ м}$ , причому використання більшої товщини пакету небажано через значне підвищення енерговитрат на очищення парів. Установлено, що ефективність очищення повітря від крапель у сітчастому фільтрі за товщини пакета  $0,01 \text{ м}$  (рис. 5, крива 1) менше ефективності очищення повітря за товщини пакета  $0,018 \text{ м}$  (рис. 5, крива 5) на 7%.

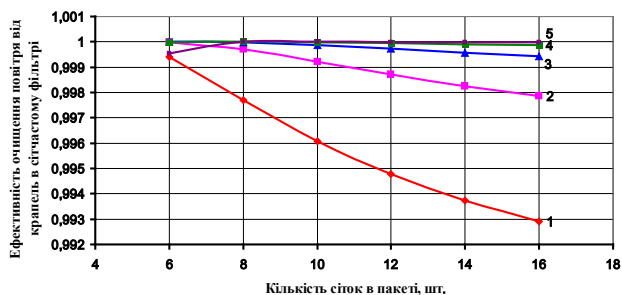


Рис. 5. Залежність ефективності очищення повітря від крапель у сітчастому фільтрі від кількості сіток у пакеті: 1–5 – за товщини пакета  $0,01$ ,  $0,012$ ,  $0,014$ ,  $0,016$  і  $0,018 \text{ м}$  відповідно

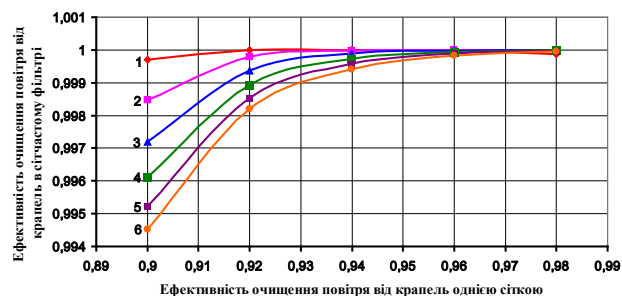


Рис. 6. Залежність ефективності очищення повітря від крапель у сітчастому фільтрі від параметрів очищення однієї сітки: 1–6 – за кількості сіток у пакеті 6, 8, 10, 12, 14 і 16 шт. відповідно

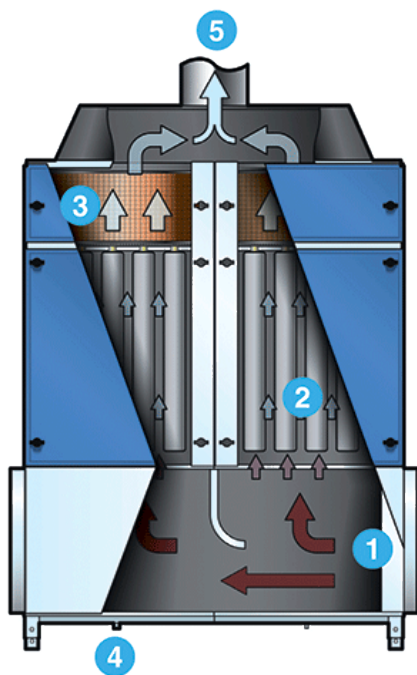


Рис. 7. Фільтр NOM 112 для видалення парів МОР і масляного туману: 1 – забруднене повітря; 2 – основний фільтр; 3 – НЕРА-фільтр; 4 – дренажна труба; 5 – вихідний патрубок

Слід зазначити, що індивідуальна ефективність однієї сітки найбільш впливає на загальну ефективність тумановловлювача. Так, за ефективності сітки 0,92–0,96 корисна дія всього фільтра становить 99,819–9,998% (рис. 6).

Відомо, що, незважаючи на досить високий ступінь уловлювання парів мастил у вигляді дрібних і збільшених часток, субмікронні частинки парів широкого спектра через незначні щілини попадають у повітря робочої зони. Природно, вони легко потрапляють у дихальну систему й легені працівників металургійних підприємств і негативно впливають на їхнє здоров'я. Для вловлювання таких часток доцільним є використання сучасних фільтрів, зроблених за картриджною схемою на основі інноваційного наповнювача Synteq XR, який характеризується високим ступенем дренажу, низькими перепадами тиску й тривалим терміном служби змінних елементів.

Саме тому для видалення парів МОР і масляного туману в умовах цеху холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» доцільним є встановлення фільтра NOM 112, який має продуктивність до 10000 м³/год. (рис. 7).

Картриджний фільтр масляного туману, виготовлений на основі фірмової нановолоконної технології UltraWeb, забезпечує надзвичайно високу ефективність очищення (до 99,999 %) повітря від частинок пари розміром від 0,5 мкм, водночас спеціальна високотемпературна обробка TermoTес гарантує збереження потрібної герметичності й міцності ущільнювачів за нагрівання до 135°C.

Слід зазначити, що запропонований фільтр NOM 112 має підвищену ефективність фільтрації, низьку вартість обслуговування, що своєю чергою, враховуючи компактність, дає змогу додатково встановлювати його у витяжну систему після розрахованого тумановловлювача.

**Висновки.** Для утилізації мастил і зниження впливу парів у цехах холодної прокатки ВАТ «Запоріжсталь» рекомендовано встановити:

- вентиляційну систему безперервного листового стану холодної прокату, яка сприяє збільшенню кратності повітрообміну в межах 10–25;
- двоступеневий тумановловлювач, застосування якого забезпечить зниження концентрації парів до 0,9 мг/м³ (за гранично допустимої величини концентрації 5 мг/м³);
- картриджний фільтр типу NOM 112 на основі нановолоконної технології для вловлювання особливо шкідливих субмікронних часток до 0,5 мкм, що забезпечує надзвичайно високу ефективність очищення (до 99,999%) і має продуктивність до 10000 м³/год.

Розрахунковим шляхом, варіюючи значеннями товщини пакета (від 0,01 до 0,018 м), кількістю сіток у пакеті (від 6 до 16 шт.) й ефективністю очищення повітря від крапель однією сіткою (від 0,9 до 0,98), визначено ефективність очищення повітря від крапель у сітчастому фільтрі тумановловлювача й надані рекомендації для вибору раціональних параметрів фільтрувальних пакетів тумановловлювача.

#### Список літератури:

1. НПАОП 27.1-1.04-09. Про затвердження правил охорони праці в прокатному виробництві підприємств металургійного комплексу [Чинний від 2009-07-29]. Київ : Державний комітет з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду, 2009. 65 с.
2. Зеркалов Д.В. Безпека праці [Електронний ресурс] : монографія. Київ : Основа, 2012. 637.
3. Kirsch P. Riskgate: Industry Sharing Risk Controls Across Australian Coal Operations. *Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering*. 2014. Vol. 11. Issue 1. P. 47–58.
4. Куріс Ю.В., Матяшева О.Б., Мнухіна Н.О. Дослідження професійного ризику робітників металургійних та енергетичних підприємств за гігієнічним критерієм оцінки умов праці виробничого середовища. *Енергетика та електрифікація*. 2017. № 2. С. 45–48.

5. Iannacchione A. The Application of Major Hazard Risk Assessment (MHRA) to Eliminate Multiple Fatality Occurrences in the US Minerals Industry. National Institute for Occupational Safety and Health. Spokane Research Laboratory. Spokane : WA, 2008. 132 p.
6. Розробка заходів покращення умов праці при виробництві чавуну / В.К. Тарасов та ін. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія «Економічні науки»*. 2018. № 2 (121). С. 82–90.
7. Assessing individual employee risk factors for occupational asthma in primary aluminium smelting / C. Bamard et al. *Occup-Environ-Med*. 2004. Jul. 61 (7). P. 604–608.
8. Characterization of clinical tolerance to inhaled zinc oxide in naive subjects and sheet metal workers / J. Fine. *J-Occup-Environ-Med*. 2000. Nov; 42 (11). P. 1085–1091.
9. Giordano C., Conticello S., Beatrice F., Montemagno A. Nonauditory effects of environmental noise: a study of metallurgical and mechanical workers. *Acta-Otorhinolaryngol-Ital*. 2001 Oct; 21 (5). 3. 281–286.

**Tarasov V.K., Vodennikova O.S., Kuris Yu.V., Matyasheva O.B.,  
Vodennikova L.V., Babochko D.Yu. RESEARCH OF MEASURES  
TO IMPROVE WORKING CONDITIONS IN COLD ROLLING SHOPS**

*Harmful and dangerous factors that arise in the process of rolling production and in particular in the process of cold rolling of steel sheets are analyzed. For the conditions of the cold rolling shop of JSC «Zaporizhstal» it was found that the permissible norms of acid vapor concentration in the pickling compartment (up to 2 times), oil vapor concentration (1.84 times) and production noise level in the rolling compartments (by 23 dBA) were exceeded. The rational means of protection of the working area from excessive noise in cold rolling shops were assessed and the reduction in the area from 297.91 m<sup>2</sup> to 9.81 m<sup>2</sup> and noise level by 21.7 dB is found, which significantly reduces noise pollution of the workspace. In order to improve the working area of the cold rolling shop, it is proposed to use both local ventilation and partial aeration. To remove vapors of process oil in the intercellular spaces of the continuous mill and behind the last stand, it is proposed to install exhaust hoods. The ventilation system of a continuous cold sheet mill promotes increase in multiplicity of an air exchange within 10–25. Attention is paid to the study of the efficiency of the system for capturing vapors of lubricating and cooling liquids using a two-stage mist-catcher, the first level of which consists of thin fibers, and the second – of a mesh spray catcher, which is used to capture large liquid particles. The efficiency of air purification from droplets in the mesh filter is analyzed depending on the thickness of the filter package, the number of grids in the package and the efficiency of vapor purification by one mesh. The expediency of using a package of 6–10 grids with a total thickness of 0.01–0.012 m is shown, while the use of a larger package thickness is undesirable due to a significant increase in energy consumption for steam cleaning. The individual efficiency of a single grid has a greatest impact on the efficiency of the mist catcher, so that with an efficiency of the grid of 0.92–0.96 the useful effect of the whole filter is 99.819–99.998%. For the conditions of the cold rolling shop of JSC «Zaporizhstal», it is proposed to use the cartridge filter of type NOM 112 on the basis of nanofiber technology for catching especially harmful submicron particles up to 0.5 microns, which provide the highest cleaning efficiency of 99.99%.*

**Key words:** working conditions, factors of the work environment, cold rolling, oil vapors, capture.



## Відомості про авторів

- Бабкін А.А.** – аспірант кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету
- Бабошко Д.Ю.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва Криворізького національного університету
- Баранік О.М.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комплексів авіаційного озброєння Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
- Беглов К.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету
- Березанський В.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комплексів авіаційного озброєння Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
- Березанський О.Г.** – викладач циклової комісії конструкції та експлуатації авіаційного озброєння Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба
- Боділовський О.К.** – аспірант кафедри електронної інженерії факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Бойко С.М.** – кандидат технічних наук, здобувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Криворізького національного університету
- Борисенко В.Д.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій Миколаївського національного університету імені В.О. Сухомлинського
- Бутовський Л.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського»
- Валуйський С.В.** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Венжега В.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка»
- Винник В.О.** – аспірант кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка»
- Власенко О.В.** – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»
- Воденнікова Л.В.** – асистент кафедри природничих дисциплін для іноземних студентів та токсикологічної хімії Запорізького державного медичного університету
- Воденнікова О.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургії Запорізького національного університету
- Гончар С.Ф.** – кандидат технічних наук, учений секретар, керівник науково-навчального центру кіберфізичних систем Інституту проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова НАН України
- Городецька О.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного технічного університету
- Грановська О.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського»
- Гришкун Є.О.** – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»
- Гуйда О.Г.** – доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
- Гумен Т.Ф.** – старший викладач кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
- Д'яченко Л.І.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
- Єфремов Ю.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»
- Жихаревич В.В.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
- Завгородній О.І.** – доктор технічних наук, професор кафедри вищої математики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка
- Залужна Г.В.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії

**Залюбовський М.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

**Калінчик В.В.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри охорони праці, цивільної та промислової безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Калінчик В.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Кальченко В.В.** – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи Національного університету «Чернігівська політехніка»

**Кальченко В.І.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка»

**Кальченко Д.В.** – аспірант кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка»

**Коваленко Г.В.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

**Когтєва О.П.** – аспірант, старший лаборант кафедри природоохоронної діяльності ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Константинов А.О.** – викладач кафедри комплексів авіаційного озброєння Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

**Концур В.О.** – магістр Одеського національного політехнічного університету

**Кравченко С.М.** – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Кудін О.В.** – доцент кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету

**Куріс Ю.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладної екології та охорони праці Запорізького національного університету

**Курпе О.Г.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри обробки металів тиском ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Кухар В.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обробки металів тиском ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Левкін А.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри кібернетики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Левкін Д.А.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри вищої математики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Лисенко О.І.** – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Макаров О.А.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри прикладної математики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

**Малишев В.В.** – доктор технічних наук, професор, директор Інженерно-технологічного інституту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

**Матяшева Ю.Б.** – викладач металургійного відділення Запорізького металургійного коледжу Запорізького національного університету

**Миронів І.В.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

**Михалевський Д.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення Вінницького національного технічного університету

**Мороз О.С.** – аспірант кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського»

**Некрасов А.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних машин і апаратів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

**Нефьодова І.В.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електромеханічних та комп'ютерних систем Навчально-наукового професійно-педагогічного інституту Української інженерно-педагогічної академії

**Нечипоренко О.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри систем керування літальними апаратами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Новіков В.І.** – старший викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ножнова М.О.** – викладач циклової комісії авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Носач О.К.** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри управління гірничим виробництвом Навчально-наукового індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Оринчак І.А.** – старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка»

**Орлов А.Т.** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри мікроелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Остапов С.Е.** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

**Панасюк І.В.** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту інженерії та інформаційних технологій Київського національного університету технологій та дизайну

**Переверзєв О.А.** – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Романюк Л.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

**Рязанцев А.М.** – інженер-конструктор Красноармійського заводу промислового обладнання

**Рязанцев М.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління гірничим виробництвом Навчально-наукового індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Свінцицький В.В.** – старший інженер служби експлуатації авіаційного озброєння Командування Повітряних Сил Збройних Сил України

**Сергієнко О.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління гірничим виробництвом Навчально-наукового індустріального інституту ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Сінчук О.М.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Криворізького національного університету

**Скляр В.М.** – аспірант кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка»

**Старченко О.С.** – аспірант кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Тарасов В.К.** – кандидат технічних наук, доцент, член-кореспондент АТНУ, Запорізький національний університет

**Трапезон К.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Уваров М.О.** – аспірант ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», помічник командира 10 воєнізованого гірничорятувального загону

**Устенко І.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Устенко С.А.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри проектного навчання в інформаційних технологіях Одеського національного політехнічного університету

**Федь М.М.** – аспірант кафедри електричних машин і апаратів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

**Чемерис В.Т.** – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, член IEEE, доцент кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Черноусенко О.Ю.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Чихіра І.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

**Шілінг А.Ю.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»

**Шумиляк Л.М.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ  
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

**Серія: Технічні науки**

**Том 31 (70) № 3 2020**

**Частина 1**

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 18,48. Ум.-друк. арк. 24,18. Зам. № 0720/195

Підписано до друку 29.04.2020. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

03150, м. Київ, вул. Велика Васильківська 74, оф. 7

Телефон +38 (048) 709 38 69,

+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: [mailbox@helvetica.com.ua](mailto:mailbox@helvetica.com.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.