

**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 32 (71) № 2 2021**

**Частина 1**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2021

## **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 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**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.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet  
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського  
(протокол № 8 від 22.04.2021 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво 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), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

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, 2021

## ЗМІСТ

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

<b>Блезнюк О.В., Дзюба А.І.</b> ТЕХНІЧНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ МАШИН У ТВАРИННИЦТВІ.....	1
<b>Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В.</b> МАШИНА ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ІЗ КІНЕМАТИЧНОЮ ПАРОЮ ЧЕТВЕРТОГО КЛАСУ – КІНЕТОСТАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	6
<b>Кутковецька Т.О.</b> ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЗЕРНОВИХ ПНЕВМАТИЧНИХ СІВАЛОК ІЗ ЦЕНТРАЛЬНОЮ РОЗПОДІЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ.....	12
<b>Луцко Л.І.</b> БАГАТОШАРОВІ ДРУКОВАНІ ПЛАТИ ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ.....	16
<b>Трубачев С.І., Воробйов М.В.</b> ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ МІЦНОСТІ ТРУБОПРОВІДІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	21

### АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

<b>Бойко С.М., Олійник Ю.Л., Журід В.І., Ємець В.В., Москалик В.М., Гусарова О.В.</b> АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У СУЧАСНИХ ТРЕНАЖЕРНИХ СИСТЕМАХ «ЕКІПАЖ-ВЕРТОЛІТ-СЕРЕДОВИЩЕ».....	26
<b>Зайцев Є.П.</b> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВІЧІ НЕЛІНІЙНОЇ ЗАДАЧІ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ІЗОТРОПНОГО ТЕРМОЧУТЛИВОГО ЦИЛІНДРА ПІД ВПЛИВОМ ЗОНАЛЬНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛООБМІНУ.....	31
<b>Колісниченко С.Ф., Рагулін С.В., Шарабайко О.М.</b> СИНТЕЗ СИСТЕМИ АКТИВНОГО БІЧНОГО УПРАВЛІННЯ БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ.....	39
<b>Olali N.V., Osaisai E.F., Olali M.O.</b> SYNTHESIS OF AUTOMATIC SYSTEM OF ANTI-SURGE PROTECTION FOR THE AVIATION GTE.....	47
<b>Чумаченко С.М., Мошенський А.О., Гуйда О.Г., Мушка А.О.</b> РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ АВІАЦІЙНОГО ПОШУКУ І РЯТУВАННЯ В УКРАЇНІ.....	56

### ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

<b>Сидоренко О.І.</b> СТАБІЛІЗУЮЧИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЯК ОСНОВА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ.....	66
--	----

### ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

<b>Бунке О.С., Новіков П.В.</b> МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ ЗБОРУ ДАНИХ МЕРЕЖЕВИМИ ВУЗЛАМИ СИСТЕМИ ІОТ.....	72
---	----

<b>Бунь В.П., Баган Т.Г.</b> ВИБІР ВИЗНАЧАЛЬНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПАРОПЕРЕГРІВАЧА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛОАГРЕГАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ КАТАСТРОФ.....	78
<b>Василенко М.Д., Золотоверх Д.С., Новіков В.П., Рачук В.О.</b> ТЕХНІКО-КОНФІДЕНЦІЙНІ АСПЕКТИ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОННО-ЦИФРОВОГО ПІДПISУ.....	84
<b>Васильєв М.В.</b> НАЛАШТУВАННЯ НЕЧІТКОГО АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗРІДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	91
<b>Гарист А.В.</b> АНАЛІЗ ЗАХИЩЕНОСТІ WI-FI МЕРЕЖ.....	97
<b>Глухова Н.В., Пісоцька Л.А.</b> СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЯСКРАВОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС ФОРМУВАННЯ ГАЗОВИХ РОЗРЯДІВ.....	102
<b>Гостіщев В.О., Максимов М.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОДОГРІЙНИМ КОТЛОМ.....	108
<b>Дубко В.О.</b> НЕКЛАСИЧНІ МОДЕЛІ СТОХАСТИЧНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ.....	114
<b>Д'яченко Л.І., Ілін А.В., Шумиляк Л.М., Газдюк К.П., Тарновецька О.Ю.</b> ОГЛЯД ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДОЛОГІЙ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕСТУВАННЯ.....	122
<b>Жуковський В.Р.</b> АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ.....	130
<b>Жученко О.А., Коротинський А.П., Хібеба М.Г.</b> РОЗРОБКА РОБАСТНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПУ ВИКЛЮЧЕННЯ.....	135
<b>Коротун О.В., Вакалюк Т.А., Кушнірчук О.М., Марцева Л.А.</b> ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ ІНТЕРАКТИВНОГО ВЕБСЕРВІСУ КІНОФІЛЬМІВ ІЗ МОЖЛИВІСТЮ ПРОГНОЗУВАННЯ КАСОВОГО УСПІХУ ФІЛЬМУ.....	141
<b>Купін А.І., Градовий О.В.</b> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ УВАЖНОСТІ ОПЕРАТОРА НА ОСНОВІ ЕНЦЕФАЛОГРАФА.....	149
<b>Ліннік І.С.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В СИСТЕМІ РЕГУЛЮВАННЯ МОДУЛЬНОЇ КОТЕЛЬНОЇ.....	158
<b>Левкін Д.А., Бережна Н.Г., Лук'янов І.М., Левкін А.В.</b> МАТЕМАТИЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ.....	164
<b>Максимов М.В., Максимова О.Б., Мінчев Д.С.</b> МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОПОСТАЧАВАННЯ.....	170
<b>Маринич І.А., Сердюк О.Ю.</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КРИСТАЛІЗАЦІЇ МЕТАЛУ НА МАШИНІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК.....	180

<b>Мельник О.Г., Мельник Р.П.</b> РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ УПРАВЛІННЯ СИЛАМИ ТА ЗАСОБАМИ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ В УМОВАХ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ.....	188
<b>Міщенко І.Л.</b> ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ РЕГУЛЯТОРІВ В АВТОМАТИЧНІЙ СИСТЕМІ РЕГУЛЮВАННЯ ГРУПОЮ ПІДГРІВАЧІВ.....	194
<b>Мошенський А.О., Савченко Ю.Г., Гуйда О.Г.</b> КОМБІНАТОРНІ ЗАСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ЧИСЛОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ.....	200
<b>Пелюх П.О.</b> ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ІЗ РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ ПІДТРИМКИ ТИСКУ ПАРИ У ДРУГОМУ КОНТУРІ.....	205
<b>Підпригора Ю.А.</b> БАГАТОДІАПАЗОННІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ЯК ОСНОВА ТОЧНОСТІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ.....	210
<b>Прокоп Ю.В., Трофименко О.Г., Дикий О.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ВИКЛАДАННЯ КУРСУ «АЛГОРИТМИ ТА СТРУКТУРИ ДАНИХ» ДЛЯ СТУДЕНТІВ ІТ-СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ.....	216
<b>Романюк О.Н., Снігур А.В., Куклій Д.В.</b> ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОФОРІЄНТАЦІЙНИХ МАРШРУТІВ НА ОСНОВІ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА.....	221
<b>Рудьковський О.Р., Киричек Г.Г.</b> ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ІЗ ПІДТРИМКИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МЕРЕЖЕВИХ ПРИСТРОЇВ ТА ДОДАТКІВ.....	229
<b>Тарахтій О.С., Бутенко О.В.</b> ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	235
<b>Топчій Н.В.</b> ЕЛЕКТРОННИЙ ДОКУМЕНТООБІГ ЯК ОСНОВА СУЧАСНОГО ДОКУМЕНТУВАННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ.....	246
<b>Хіль В.В.</b> ПОРІВНЯННЯ КЛАСИЧНОЇ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПЕРВИННОГО ПЕРЕГРІВУ ПАРИ З ВВЕДЕННЯМ ПОХІДНОЇ У ДОВІЛЬНІЙ ТОЧЦІ З НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ.....	250
<b>Чернишов К.А., Майданюк В.П., Арсенюк І.Р.</b> ПРИНЦИПИ ПРОЕКТУВАННЯ СУЧАСНИХ ВЕНДИНГОВИХ СИСТЕМ.....	256
<b>Шілінг А.Ю.</b> АРХІТЕКТУРА ОНЛАЙН-СИСТЕМИ РЕКОМЕНДАЦІЙ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ В ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....	263
<b>ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....</b>	272

# CONTENTS

## INDUSTRIAL ENGINEERING

**Bleznyuk O.V., Dziuba A.I.**

TECHNICAL OPERATION OF MACHINES IN LIVESTOCK.....1

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

MACHINE FOR PROCESSING PARTS WITH A KINEMATIC STEAM  
OF THE FOURTH CLASS – KINETOSTATIC RESEARCH.....6

**Kutkovetska T.O.**

THE DEVELOPMENT TRENDS OF PNEUMATIC GRAIN DRILLS  
WITH CENTRAL DISTRIBUTION SYSTEM.....12

**Lutsko L.I.**

MULTI-LAYER PRINTED CIRCUIT BOARD AND BASIC METHODS  
OF THEIR PRODUCTION.....16

**Trubachev S.I., Vorobiov M.V.**

DETERMINATION OF CONDITIONS OF STRENGTH OF PIPELINES OF ENERGY  
AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT BY METHODS OF COMPUTER MODELING.....21

## AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

**Boiko S.M., Oliinyk Yu.L., Zhurid V.I., Yemets V.V., Moskalyk V.M., Husarova O.V.**

ASPECTS OF USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN MODERN TRAINING SYSTEMS  
“CREW-HELICOPTER-ENVIRONMENT”.....26

**Zaytsev E.P.**

MATHEMATICAL MODELING OF A DOUBLY NONLINEAR PROBLEM  
OF UNSTEADY HEAT CONDUCTION OF A TRANSVERSELY ISOTROPIC  
THERMOSENSITIVE CYLINDER UNDER THE IMPACT  
OF THE ZONAL HIGH-TEMPERATURE HEAT TRANSFER.....31

**Kolesnychenko S.F., Rahulin S.V., Sharabaiko A.N.**

SYNTHESIS OF AN ACTIVE SIDE CONTROL SYSTEM  
FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE.....39

**Olali N.V., Osaisai E.F., Olali M.O.**

SYNTHESIS OF AUTOMATIC SYSTEM OF ANTI-SURGE PROTECTION  
FOR THE AVIATION GTE.....47

**Chumachenko S.M., Moshenskyi A.O., Guida O.H., Mushka A.O.**

DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL-FUNCTIONAL MODEL  
OF THE AVIATION SEARCH AND RESCUE SYSTEM IN UKRAINE.....56

## ELECTRICAL ENGINEERING

**Sydorenko O.I.**

STABILIZING CONVERTER AS THE BASIS OF THE SYSTEM  
OF STABILIZATION OF ELECTRIC OUTPUT VOLTAGE PARAMETERS.....66

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

**Bunke O.S., Novikov P.V.**

METHOD OF OPTIMIZATION OF DATA COLLECTION ALGORITHMS  
FOR NETWORK NODES OF THE IOT SYSTEM.....72

<b>Bun V.P., Bahan T.H.</b> SELECTION OF DEFINITIVE DIAGNOSTIC PARAMETERS OF A STEAM HEATER OF A DIRECT-FLOW BOILER USING THE METHODS THEORY OF CATASTROPHE.....	78
<b>Vasilenko M.D., Zolotoverkh D.S., Novikov V.P., Rachuk V.O.</b> TECHNICAL AND CONFIDENTIAL ASPECTS OF THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE ELECTRONIC-DIGITAL SIGNATURE.....	84
<b>Vasyliiev M.V.</b> ADJUSTMENT OF FUZZY ADAPTIVE REGULATOR OF COMPRESSOR UNIT FOR LIQUEFACTION OF NATURAL GAS.....	91
<b>Haryst A.V.</b> WI-FI NETWORK SECURITY ANALYSIS.....	97
<b>Hlukhova N.V., Pisotska L.A.</b> STATISTICAL ANALYSIS OF RADIATION BRIGHTNESS PARAMETERS DURING THE FORMATION OF GAS DISCHARGES.....	102
<b>Gostishchev V.O., Maksimov M.V.</b> RESEARCH OF AUTOMATIC BOILER CONTROL SYSTEM.....	108
<b>Doobko V.A.</b> NON-CLASSICAL MODELS OF STOCHASTIC DYNAMICAL SYSTEMS.....	114
<b>Diachenko L.I., Ilin A.V., Shumylyak L.M., Hazdiuk K.P., Tarnovetska O.Yu.</b> SOFTWARE AND METHODOLOGIES FOR THE IMPLEMENTATION OF AUTOMATED TESTING SYSTEMS.....	122
<b>Zhukovskiy V.R.</b> ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF IMPLEMENTATION OF THE AUTOMATIC LOAD REGULATOR SYSTEM OF HEATING BOILERS.....	130
<b>Zhuchenko O.A., Korotynskiy A.P., Khibeba M.H.</b> DEVELOPMENT OF AUTOMATIC ROBUST CONTROL SYSTEMS BASED ON DROPOUT PRINCIPLE.....	135
<b>Korotun O.V., Vakaliuk T.A., Kushnirchuk O.M., Martseva L.A.</b> THEORETICAL ASPECTS OF DEVELOPING AN INTERACTIVE WEB SERVICE OF MOVIES WITH THE ABILITY TO PREDICT THE BOX OFFICE SUCCESS OF THE FILM.....	141
<b>Kupin A.I., Hradovyi O.V.</b> INTELLECTUAL OPERATOR ATTENTION CONTROL SYSTEM BASED ON ENCEPHALOGRAPH.....	149
<b>Linnik I.S.</b> INVESTIGATION OF FUZZY LOGIC POSSIBILITIES IN MODULATING BOILER CONTROL SYSTEM.....	158
<b>Levkin D.A., Berezhna N.G., Lukyanov I.M., Levkin A.V.</b> MATHEMATICAL TOOLS FOR APPLIED PROBLEMS SOLVING.....	164
<b>Maksymov M.V., Maksymova O.B., Minchev D.S.</b> METHODS AND MODELS OF CONTROL SYSTEM WITH VARIABLE STRUCTURE OF HEAT SUPPLY OBJECTS.....	170
<b>Marynych I.A., Serdiuk O.Yu.</b> MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL STATE OF WORKPIECES FOR IMPROVEMENT OF CONTROL OF METAL CRYSTALLIZATION PROCESS ON CONTINUOUS CASTING MACHINE.....	180

<b>Melnyk O.G., Melnyk R.P.</b> DEVELOPMENT OF THE METHOD OF INFORMATION PROTECTION OF INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEMS FOR MANAGEMENT OF FORCES AND MEANS OF CIVIL PROTECTION IN CONDITIONS OF DECENTRALIZATION.....	188
<b>Mishchenko I.L.</b> OPTIMIZATION OF REGULATORS OPERATION IN THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM BY A GROUP OF HEATERS.....	194
<b>Moshenskyi A.O., Savchenko Yu.H., Huida O.H.</b> COMBINATORIAL MEANS OF IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF PSEUDO-RANDOM NUMERICAL SEQUENCES.....	200
<b>Peliukh P.O.</b> FUNCTIONAL SCHEME OF AUTOMATED SYSTEM OF REGULATION OF POWER OF NPP WITH VVER-1000 REACTOR IN THE MODE OF STEAM PRESSURE SUPPORT IN THE SECOND CIRCUIT.....	205
<b>Pidopryhora Yu.A.</b> MULTI-RANGE OPTO-ELECTRONIC SYSTEMS AS THE BASIS OF ACCURACY OF GEOMETRIC MEASUREMENTS.....	210
<b>Prokop Yu.V., Trofymenko O.H., Dykyi O.V.</b> RESEARCH OF APPROACHES TO TEACHING THE COURSE “ALGORITHMS AND DATA STRUCTURES” FOR COMPUTER SCIENCE STUDENTS.....	216
<b>Romaniuk O.N., Snigur A.V., Kuklii D.V.</b> OPTIMIZATION OF THE ROUTES OF CAREER GUIDANCE BASED ON THE MISSION OF A SALESMAN.....	221
<b>Rudkovskyi O.R., Kyrychek H.H.</b> SOFTWARE PACKAGE TO SUPPORT DISTRIBUTED INTERACTION OF NETWORK DEVICES AND APPLICATIONS.....	229
<b>Tarakhtii O.S., Butenko O.V.</b> SIMULATION MODEL OF SOLID WASTE AS A CONTROL OBJECT.....	235
<b>Topchii N.V.</b> ELECTRONIC DOCUMENT FLOW AS THE BASIS OF MODERN DOCUMENTATION AT THE ENTERPRISE.....	246
<b>Khil V.V.</b> PORTIVE CLASSIC AUTOMATIC SYSTEMS FOR REGULATING THE FIRST OVERLOOKING OF THE STEAM WITH THE INPUTED STEADY AT THE ADVANCED REGULATOR WITH AN INACCURATE REGULATOR.....	250
<b>Chernyshov K.A., Maidaniuk V.P., Arseniuk I.R.</b> DESIGNING PRINCIPLES OF MODERN VENDING SYSTEMS.....	256
<b>Shilinh A.Yu.</b> ARCHITECTURE OF THE RECOMMENDATIONS ONLINE SYSTEM FOR IMPROVING THE EDUCATIONAL PROCESS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS.....	263
<b>INFORMATION ABOUT AUTHORS.....</b>	272



# ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.173

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/01>**Блезнюк О.В.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

**Дзюба А.І.**

Луганський національний аграрний університет

## ТЕХНІЧНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ МАШИН У ТВАРИННИЦТВІ

У роботі наведено теоретичне узагальнення і пошук вирішення завдання, яке полягає у розкритті суті технічної експлуатації машин у тваринництві та її оцінки. Встановлено, що комплексна механізація тваринницьких ферм вимагає безвідмовного функціонування машин і устаткування, а також їх ефективного застосування. Перебої в роботі машин негативно позначаються на продуктивності тварин і можуть бути причиною їх захворювання і вибракування. Сукупність заходів, спрямованих на підтримку машин і устаткування в справному стані у період їх використання, визначається технічною експлуатацією. Основою технічної експлуатації машин і устаткування тваринницьких ферм є система технічного обслуговування і ремонту. Технічне обслуговування є профілактичним заходом, під час організації якого враховуються особливості технологічних процесів і умови експлуатації машин і устаткування на тваринницьких фермах. Одним із напрямів підвищення ефективності технічної експлуатації машин і устаткування у тваринництві є оптимальне управління процесом контролю за технічним станом та проведення технічного обслуговування і ремонту. Одночасно з технічним обслуговуванням зазвичай проводиться діагностика стану машин і устаткування або окремих вузлів і агрегатів з тим, щоб визначити дійсну потребу в операціях, які не є обов'язковими під час проведення цього виду періодичного обслуговування. Сучасні методи технічної діагностики дозволяють впливати не тільки на стан машин і устаткування, але і на систему технічного обслуговування. Саме це є обов'язковою умовою переходу до більш прогресивної системи технічного обслуговування та ремонту за фактичним станом, граничних значень параметрів технічного стану. Відтак у перспективі технічна діагностика стане основним регулятором в управлінні технічним станом машин, якістю їх виготовлення, технічного обслуговування і ремонту. Як оцінку ефективності технічної експлуатації машин у тваринництві доречно застосовувати комплексні показники: коефіцієнт готовності; коефіцієнт простою; коефіцієнт оперативної готовності; коефіцієнт технічного використання.

**Ключові слова:** тваринництво, технічна експлуатація, технічний стан, машина, діагностика, комплексні показники.

**Постановка проблеми.** Сучасна тваринницька ферма являє собою велике спеціалізоване сільськогосподарське підприємство промислового типу з комплексною механізацією виробничих процесів. Машини і устаткування, які застосовуються на цих фермах, можна поділити на машини і устаткування загального призначення – енергетичні установки, водопровід, опалення, вентиляція, та технологічне устаткування – кормоприготувальні машини, обладнання для машинного доїння, групові і індивідуальні поїлки для худоби, пристрої для опромінення молодняка тварин і технологічний транспорт, конвеєри для прибирання гною, різні кормороздатчики. Застосування на тваринницьких фермах, комплексах складних

машин і устаткування дозволяє знизити витрати праці. Однак у структурі витрат виробництва продукції тваринництва питома вага витрат на підтримку техніки в працездатному стані залежно від рівня її зносу складає 10...18% [1; 5]. Зумовлено це не тільки старінням використовуваного парку машин і устаткування, але і ускладненням конструкцій техніки, жорсткістю вимог до надійності та працездатності, збільшенням номенклатури автоматизованої техніки.

Проблема надійності машин і устаткування у тваринництві стоїть значно гостріше, ніж аналогічна проблема в інших галузях сільськогосподарського виробництва [4; 6]. Простої машинно-тракторного агрегату під час оранки, сівби,

міжрядної обробки може лише уповільнити, але не зупинити цикл сільськогосподарських робіт, оскільки на його місце можна поставити іншу техніку з резерву або зняти її для цих цілей з інших, менш важливих робіт. У тваринництві ж це зробити практично неможливо. Щоб забезпечити вимоги до технології виробництва, доїльні установки, кормоприготувальні агрегати і деяке інше обладнання на фермах повинні перебувати в постійній готовності і працювати щодня в строго встановлений час, а обладнання мікроклімату, систем водопостачання та каналізації – забезпечувати цілодобове функціонування відповідних технологічних процесів у безперервному режимі протягом усього календарного року або окремих періодів стійлового утримання тварин [2; 3]. Відтак простої техніки на тваринницьких комплексах понад нормативні неприпустимі, оскільки спричиняють зниження продуктивності праці і збільшують собівартість одержуваної продукції м'яса, молока, яєць. Оцінка ефективності технічної експлуатації машин за допомоги комплексних коефіцієнтів дозволить скорегувати організаційні і технічні заходи в системі технічного обслуговування і ремонту машин [9].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ефективність управління процесом технічної експлуатації машин і устаткування залежить від ефективності роботи системи технічного обслуговування та ремонту та її підсистем, зокрема, діагностування, техніко-економічні показники яких своєю чергою залежать від того, наскільки їх технологія і організація наближені до оптимальної [7–9]. Для машин і устаткування тваринницьких ферм відповідно до діючих стандартів встановлені наступні види ремонтно-обслуговуючих впливів: щозмінне технічне обслуговування (ЩТО); періодичне технічне обслуговування (ТО-1) для всіх машин і для окремих видів устаткування (ТО-2); технічне обслуговування під час зберігання (підготовки, в процесі і під час зняття зі зберігання); технічний огляд; ремонт (поточний для всіх і капітальний для складних машин).

Особливість ремонтно-обслуговуючого циклу машин і устаткування у тваринництві полягає в тому, що він визначається характеристиками надійності технічних пристроїв і періодами розвитку тварин, організації утримання, сезонами року [4]. Безвідмовність машин і устаткування може бути забезпечена своєчасним і якісним технічним обслуговуванням, який попереджає раптові зупинки у процесі їх роботи. Дослідженнями вчених встановлено, що зі збільшенням частоти

технічного обслуговування протягом року забезпечуються висока надійність машин і продуктивність тварин [5; 9]. Однак при цьому різко зростають витрати коштів і праці на підтримку постійної працездатності техніки ферм, комплексів і птахофабрик, які часом перекривають економічний ефект, одержуваний від підвищення безвідмовності машин. У разі зменшення числа обслуговувань зменшуються витрати на технічне обслуговування, але виникають часті раптові відмови і тривалі простої машин. У зв'язку з цим дуже важливим є встановлення оптимальної періодичності технічного обслуговування машин і обладнання ферм, комплексів і птахофабрик за допомоги діагностування [6; 7], що забезпечує таку надійність і працездатність, за яких сума витрат на технічне обслуговування і усунення відмов, а також матеріальні збитки від простою обладнання становили б мінімум або максимум економічного ефекту.

Відповідно до технічної експлуатації машин і устаткування тваринницьких ферм пред'являються відповідні вимоги, які і визначають її основні завдання: утримувати машини і устаткування на тваринницьких фермах і комплексах в стані постійної готовності до виконання виробничих процесів і зберігати в період експлуатації високу їх надійність і працездатність; забезпечувати протягом усього терміну служби високу продуктивність і якість роботи як окремих машин і устаткування, так і поточних технологічних ліній на тваринницьких фермах і комплексах в режимі суворо зумовлених технологічними параметрами виробничих процесів і умовами утримання тварин; знижувати витрати праці, грошових і матеріально-технічних засобів на технічне обслуговування і ремонт машин [8].

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розгляд напряму розвитку та означення ефективності технічної експлуатації машин у тваринництві.

**Виклад основного матеріалу.** Основними експлуатаційними властивостями машин і технологічного устаткування в тваринництві є зоотехнічні, технологічні, енергетичні, техніко-економічні, естетико-ергономічні та загально-технічні властивості. Зоотехнічні властивості машин в тваринництві визначають відповідність конструкції виробничої і технічної експлуатації її зоотехнічним вимогам, передбаченим нормативно-технічною документацією, включаючи зоотехнічні вимоги, стандарти і документацію на типову операційну технологію механізованих робіт. Технологічні властивості машин повинні забезпечу-

вати високу якість виконуваного технологічного процесу – ступінь однорідності кормової суміші, рівномірність роздачі кормів по фронту годівлі, повнота видоювання вим'я доїльним апаратом. Енергетичні властивості машин характеризують їх здатність споживати під час експлуатації певний вид енергії, розвивати потужність, передавати крутний момент, долати зовнішній опір. Експлуатаційні властивості машин залежать від багатьох факторів. Основні чинники діляться на три групи: конструктивні – тип, форма, розміри і число робочих органів і виконавчих механізмів, особливості двигунів і проміжних пристроїв, якість застосовуваних матеріалів і виготовлення, ступінь уніфікації і взаємозамінності, стабільність регулювань машин в часі; технологічні – специфіка технології робіт і особливості виконання основних і допоміжних операцій, які застосовується організацією, обслуговування машин і тварин, циклічність процесу, ступінь автоматизації процесу і управління ним; експлуатаційні – характер впливу, технічний стан машин, якість і своєчасність технічного обслуговування, відповідність регулювань вимогам нормативно-технічної документації, вибір організаційних форм і застосування раціональних режимів машиновикористання, вибір методу резервування, умови навколишнього середовища, природно-кліматичні умови, біологічні особливості тварин, специфіка оброблюваного матеріалу.

Основою технічної експлуатації машин і устаткування тваринницьких ферм є система технічного обслуговування і ремонту. Технічне обслуговування є профілактичним заходом, під час організації якого враховуються особливості технологічних процесів і умови експлуатації машин і устаткування на тваринницьких фермах. У тих господарствах, в яких відповідним чином виконується технічне обслуговування машин і устаткування, майже повністю виключені порушення технологічних процесів годування, доїння та інших операцій по догляду за тваринами. Одночасно з технічним обслуговуванням зазвичай проводиться діагностика стану машин і устаткування або окремих їх вузлів і агрегатів з тим, щоб визначити дійсну потребу в операціях, які не є обов'язковими під час проведення цього виду періодичного обслуговування. В цьому разі діагностика виступає як технологічний елемент технічного обслуговування. Сутність діагностики полягає в тому, що вона дозволяє визначити технічний стан машин і устаткування без їх повного розбирання за допомогою комплектів контрольно-вимірювальних приладів і апаратури. Одним з основних завдань

діагностики є визначення показників, за допомогою яких можна достовірно оцінювати технічний стан окремої машини або устаткування. Діагностику застосовують як у виробничих умовах, так і в умовах стендової перевірки всього обладнання або окремих його вузлів і приладів.

Ефективність діагностики складається з двох складників: ефекту від вдосконалення технічної експлуатації машин і устаткування і витрат на процес діагностування. Збільшення першого складника і зменшення другого призводить до зниження витрат на виробництво тваринницької продукції.

Діагностика поділяється на три види: експлуатаційну, передремонтну і післяремонтну. Експлуатаційна діагностика проводиться в період експлуатації машин і устаткування, щоб визначити обсяг технічного обслуговування і виявити причини відмов механізмів. Передремонтна діагностика встановлює обсяг робіт з ремонту машин та устаткування після напрацювання певної кількості часу або переробки певної кількості продукції. Післяремонтну діагностику проводять для визначення якості виконаних ремонтних робіт.

Сучасні методи технічної діагностики дозволяють впливати не тільки на стан машин і устаткування, але і на систему технічного обслуговування. Саме це є обов'язковою умовою переходу до більш прогресивної системи технічного обслуговування та ремонту за фактичним станом, граничних значень параметрів технічного стану.

Ефективність технічної експлуатації машин і системи технічного обслуговування загалом оцінюється за допомоги комплексних показників: коефіцієнта готовності; коефіцієнта простою; коефіцієнта оперативної готовності; коефіцієнта технічного використання [9].

Коефіцієнт готовності визначається ймовірністю того, що система буде працездатною за умови тривалої експлуатації, стаціонарного режиму. Значення коефіцієнта готовності змінюється від нуля, коли всі елементи за аналізований період непрацездатні, до одиниці, коли всі елементи за аналізований період працездатні.

Статистична оцінка коефіцієнта готовності:

$$K_r(t) = \frac{T}{T + T_B} = \frac{1}{1 + \omega T_B} = 1 / \left( 1 + \frac{\omega}{\mu} \right), \quad (1)$$

де  $T$  – напрацювання на відмову,  $T_B$  – середній час відновлення,  $\omega$  – параметр потоку відмов;  $\mu$  – параметр потоку відновлень.

Для безперервно діючих об'єктів коефіцієнт готовності визначається як:

$$K_r = \frac{T_k - t_B}{T_k}, \quad (2)$$

де  $T_k$  – календарний час роботи об'єкта, протягом якого зафіксовано сумарний час відновлення  $t_B$ .

Коефіцієнт готовності оцінює дві властивості – безвідмовність і здатність до відновлення, та характеризує експлуатаційну технологічність об'єкта, якість планування робіт, досконалість засобів експлуатації і ремонту, рівень організації робіт, кваліфікацію персоналу.

Коефіцієнт простою визначається ймовірністю того, що об'єкт виявиться в непрацездатному стані в довільно обраний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких застосування об'єкта не передбачається. Коефіцієнт простою характеризує ймовірність непрацездатного стану відновлюваного об'єкта під час його тривалої експлуатації.

Статистична оцінка коефіцієнта простою:

$$K_{II}(t) = \frac{T_B}{T + T_B} = \frac{1}{1 + \mu T} = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{\omega}}. \quad (3)$$

З коефіцієнтом простою тісно пов'язаний час простою. Він визначається виразом:

$$T_{II} = K_{II}(t) \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Коефіцієнт оперативної готовності – це ймовірність того, що об'єкт, перебуваючи в режимі очікування, виявиться в працездатному стані в довільний момент часу  $i$ , починаючи з цього моменту, буде працювати безвідмовно протягом заданого інтервалу часу. Коефіцієнт характеризує надійність об'єктів, необхідність застосування яких виникає в довільний момент часу, після якого відбувається безвідмовна робота протягом заданого часу. Чисельне значення коефіцієнта оперативної готовності дорівнює добутку коефіцієнта готовності  $K_r(t)$  на ймовірність безвідмовної роботи об'єкта в інтервалі часу  $\tau$ :

$$K_{Or}(t, \tau) = K_r(t) \cdot P(\tau). \quad (5)$$

Статистична оцінка коефіцієнта оперативної готовності:

$$K_{Or}(t, \tau) = \frac{N_t(\tau)}{N}, \quad (6)$$

де  $N_t(\tau)$  – число об'єктів, справних на момент часу  $t$ , які безвідмовно працювали протягом часу  $\tau$ ,  $N$  – загальне число об'єктів.

Якщо цикл експлуатації відновлюваних об'єктів крім інтервалів безвідмовної роботи і періодів відновлення містить простої, зумовлені технічним обслуговуванням об'єкта у процесі експлуатації, профілактичної роботи, то для комплексної оцінки їх надійності застосовується коефіцієнт технічного використання, який являє ймовірність того, що об'єкт в довільний момент часу буде в працездатному стані з урахуванням проведення технічного обслуговування.

Статистична оцінка коефіцієнта технічного використання:

$$K_{TB} = \frac{T}{T + T_B + T_{TO}}. \quad (7)$$

Коефіцієнт технічного використання поряд з безвідмовністю і ремонтпридатністю оцінює експлуатаційно-технічні властивості об'єкта – потребу в технічному обслуговуванні.

**Висновки.** Встановлено, що комплексна механізація тваринницьких ферм вимагає безвідмовного функціонування машин і устаткування, а також їх ефективного застосування. Удосконалення конструкцій і підвищення надійності машин, що використовуються у тваринництві, сприяли впровадженню в практику комбінованої системи технічного обслуговування, коли частина операцій та заходів обов'язково здійснюється в передбачені нормативами строки, а інша частина виконується відповідно до фактичного стану машини, визначеного під час її технічного огляду з використанням засобів контролю і діагностики. Відтак у перспективі технічна діагностика стане основним регулятором в управлінні технічним станом машин, якістю їх виготовлення, технічного обслуговування і ремонту. При цьому ефективність технічної експлуатації машин у тваринництві доречно оцінювати за допомогою комплексних показників.

#### Список літератури:

1. Цой Л.М. Современные проблемы технического сервиса в животноводстве. *Вестник ВНИИМЖ* № 1(17)-2015. С. 21–26.
2. Технічний сервіс машин у тваринництві : підручник. Київ-Харків : НАУ (ХНТУСГ), 2007. 280 с.
3. Проектування технологічних процесів у тваринництві : підручник. Київ : ЦП «Компринт», 2018. 292 с.
4. Болтянська Н.І. Забезпечення високоефективного функціонування технологічного процесу виробництва продукції тваринництва шляхом підвищення рівня надійності техніки. *Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*. 2018. Вип. 282, ч.1. С. 181–92.

5. Ковалёв Л.И. Анализ систем технического обслуживания и ремонта в животноводстве. *RJOAS*, 4(40), April 2015. С. 29–37.
6. Чебан П.М. Надійність та технічна експлуатація машин і обладнання для тваринництва і кормовиробництва. *Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві* : матеріали конференції. Глеваха-Київ, 2020. С. 155–158.
7. Брусенков А.В. Капустин В.П. Техническое диагностирование машин и оборудования в животноводстве. *Вестник ВНИИМЖ* № 2(26). 2017. С. 211–214.
8. ГОСТ 24628 Техническая диагностика. Диагностирование машин и оборудования для животноводства и кормопроизводства. Общие технические требования.
9. Ананьин А.Д., Михлин В.М. Диагностика и техническое обслуживание машин: учебник для студентов высш. учеб. заведений. Москва : Академия, 2008. 438 с.
10. Блезнюк О.В., Иванов В.І. Методологічний підхід визначення показників експлуатаційної надійності машин. Abstracts of the 4th International scientific and practical conference. *Priority directions of science and technology development*. Kyiv, Ukraine, 2020. С. 316–323.

### **Bleznyuk O.V., Dziuba A.I. TECHNICAL OPERATION OF MACHINES IN LIVESTOCK**

*The theoretical generalization and search for solving a task, which consists in the disclosure of the essence of technical operation of machines in livestock and assessment. It has been established that the complex mechanization of livestock farms requires the failure functioning of machines and equipment, as well as their effective application. The interruptions in the work of machines are negatively affected by animal productivity and may cause their disease and elect. A set of measures aimed at supporting machines and equipment in a good condition during their use are determined by technical operation. The basis of technical operation of machines and equipment of livestock farms is a system of maintenance and repair. Maintenance is a prophylactic measure, with which the features of technological processes and operating conditions and equipment on livestock farms are taken into account. One of the directions to improve the efficiency of technical operation of machines and equipment in animal husbandry is the optimal management of the control process and maintenance and repair and repair. Simultaneously with maintenance, as a rule, diagnostics of machines and equipment or individual nodes and units in order to determine the real need for transactions that are not mandatory during this type of periodic maintenance. Modern methods of technical diagnostics allow you to influence not only on the state of machines and equipment, but also on the maintenance system. This is a mandatory condition for the transition to a more progressive system of maintenance and repair by the actual state, the limit values of the parameters of a technical condition. Consequently, in the long run, technical diagnostics will become the main regulator in the management of the technical condition of machines, the quality of their manufacture, maintenance and repair. As an assessment of the efficiency of technical operation of machines in animal husbandry it is appropriate to use complex indicators: the readiness factor; simple coefficient; operational readiness coefficient; a coefficient of technical use.*

**Key words:** animal husbandry, technical operation, technical condition, machine, diagnostics, complex indicators.

**Залюбовський М.Г.**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

**Панасюк І.В.**

Навчально-науковий інститут інженерії та інформаційних технологій  
Київського національного університету технологій та дизайну

**Малишев В.В.**

Інженерно-технологічний інститут  
Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

## МАШИНА ДЛЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ІЗ КІНЕМАТИЧНОЮ ПАРОЮ ЧЕТВЕРТОГО КЛАСУ – КІНЕТОСТАТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

*Задля реалізації фінішних процесів оздоблювально-зачищувальної обробки дрібних металевих та полімерних деталей застосовують різноманітні типи обладнання: вібраційні машини та машини з обертовими ємностями, шпиндельні та щіткові машини, а також машини зі складним просторовим рухом робочих ємностей. Найбільш перспективним типом галтувального обладнання вважають машини зі складним просторовим рухом робочих ємностей. Використання такого типу обладнання призводить до значного збільшення продуктивності виконання фінішних оздоблювально-зачищувальних операцій, що зумовлено інтенсифікацією руху робочого масиву всередині ємностей. Відомі різні види машин зі складним просторовим рухом робочих ємностей із відмінними конструктивними та технологічними особливостями. Кожен вид машин зі складним просторовим рухом робочих ємностей потребує достеменного дослідження, в тому числі кінетостатичного. За допомогою системи автоматизованого проектування SolidWorks виконано 3D-моделювання та подальше кінетостатичне дослідження машини для обробки деталей із кінематичною парою четвертого класу, яке полягає у визначенні та аналізі реакцій в усіх кінематичних парах просторового статично визначеного шарнірного механізму машини. Встановлено взаємозв'язок між зміною міжосьової відстані проміжного шатуна (робочої ємності) та максимальними значеннями реакцій у кінематичних парах машини. Максимальні значення осьових та радіальних складових реакцій у кожній кінематичній парі просторового механізму зростали зі збільшенням міжосьової відстані проміжного шатуна. Встановлено раціональний діапазон варіювання міжосьової відстані проміжного шатуна (робочої ємності), що забезпечує утворення найменших значень реакцій в усіх кінематичних парах просторового шарнірного механізму машини під час її експлуатації за гранично допустимої кутової швидкості ведучого валу. Отримані результати досліджень можуть стати у нагоді в процесі проектування відповідного галтувального обладнання з ємностями, що виконують складний просторовий рух.*

**Ключові слова:** кінематична пара четвертого класу, просторовий шарнірний механізм, галтування, фінішні технологічні операції.

**Постановка проблеми.** Задля реалізації фінішних процесів оздоблювально-зачищувальної обробки дрібних металевих та полімерних деталей, таких як відділення деталей від ливників [1, с. 10], полірування, шліфування [2, с. 25] та глянцювання, заокруглення гострих країв та очищення від продуктів корозії [3, с. 20–130] тощо, застосовують різні типи галтувального обладнання, в яких робочі ємності виконують складний просторовий рух [4, с. 18–21]. Попередньо було доведено, що використання таких типів обладнання сприяє підвищенню продуктивності та дає змогу значно скоротити час виконання відповід-

них оздоблювально-зачищувальних технологічних операцій, призводить до зменшення енерговитрат [5, с. 150–174]. Авторами розроблений ряд машин зі складним просторовим рухом робочих ємностей із відмінними конструктивними та технологічними особливостями: машини з додатковими рухомими ланками [6, с. 55–62], машина з двома робочими ємностями, які з'єднані поступальною чи обертальною кінематичними парами, машина з додатковою рухомою ланкою – повзуном [7, с. 145], машини з видозміненими робочими ємностями [8, с. 70–12] тощо. Усі ці вдосконалення приймалися щодо «базової» конструкції машини,

що була розроблена у 1966 році швейцарською фірмою Willy A. Bachofen (WAB) [9] та мала суттєвий недолік – наявність пасивного зв'язку в кінематичному ланцюзі просторового шестиланкового механізму, який негативно впливає [10, с. 1040] на експлуатаційні властивості машини загалом. Удосконалення «базової» конструкції машини призводить до зміни конструктивних особливостей, збільшення ступеня рухомості просторового механізму, що своєю чергою впливає на утворення додаткової складової частини переміщення рухомих ланок механізму між собою з відповідною амплітудою. Таким чином, із метою раціонального використання розроблених конструкцій машин важливо виконати їх кінестатичне дослідження задля визначення реакцій в усіх кінематичних парах просторового механізму, гранично допустимих значень міжосьових відстаней відповідних рухомих ланок, за якої реакції в кінематичних парах розроблених машин будуть перевищувати максимальні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини. Попередньо вже були проведені кінестатичні дослідження деяких розроблених конструкцій машин [11, с. 14–16; 12, с. 129–130]. Однак нині ще залишаються галузеві конструкції машин, для яких не виконувалося відповідне кінестатичне дослідження.

**Постановка завдання.** Метою роботи є кінестатичне дослідження машини для обробки деталей із кінематичною парою четвертого класу, яке полягає у визначенні та аналізі реакцій в усіх кінематичних парах просторового шарнірного механізму машини за допомогою САПР SolidWorks, а також дослідження впливу зміни міжосьової відстані проміжного шатуна (робочої ємності) на максимальні значення реакцій у кінематичних парах машини.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Було розроблено конструкцію машини, в якій використовується кінематична пара четвертого класу, представлена на рис. 1. За допомогою кінематич-

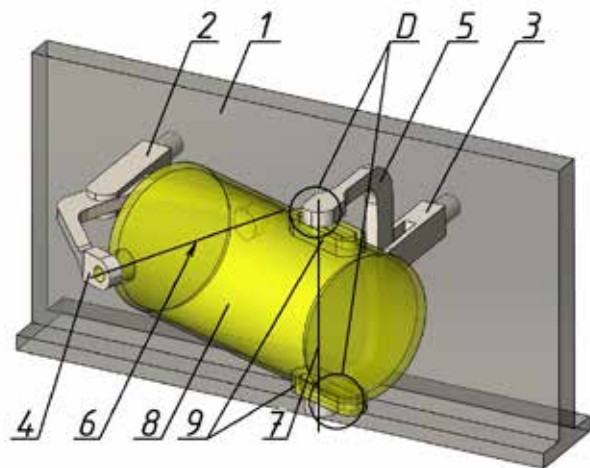


Рис. 1. Модель розробленої конструкції машини з кінематичною парою четвертого класу

ної пари четвертого класу між собою з'єднані ведений шатун та проміжний шатун (робоча ємність). Основні геометричні та конструктивні параметри моделі машини з кінематичною парою четвертого класу, виконаної у САПР SolidWorks, приймалися аналогічними до параметрів промислового змішувача «Turbula T10B» («базова» конструкція машини). Ці геометричні параметри моделі машини представлені в таблиці 1.

Машини складається зі станини 1, ведучого 2 та веденого 3 валів, які встановлені у станині паралельно в одній площині. Ведучий вал 2 кінематично з'єднаний із ведучим шатуном 4, а ведений вал 3 – із веденим шатуном 5. Діаметрально взаємоперпендикулярні вісі 6 та 7 ведучого шатуна 4 та веденого шатуна 5 є вісями кріплення проміжного шатуна 8 (робочої ємності). У цій конструкції машини ведений шатун 5 із проміжним шатуном 8 з'єднані за допомогою кінематичної пари четвертого класу *D*, усі інші кінематичні пари – обертальні п'ятого класу.

Із використанням кінематичної пари четвертого класу ведений шатун 5 щодо проміжного

Таблиця 1

Геометричний параметр машини	Значення коефіцієнта <i>Δ</i>				
	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Діаметр робочої ємності $d_{PC}$	0,318 м				
Довжина (між торцями) робочої ємності $l_{Ц}$	0,430 м	0,480 м	0,535 м	0,590 м	0,640 м
Міжосьова відстань ведучого та веденого шатунів $l_{Ш(В)}$	0,272 м				
Міжосьова відстань проміжного шатуна $l_{Ш(ПРОМ)}$	0,330 м	0,380 м	0,435 м	0,490 м	0,540 м
Об'єм робочої ємності $V_{PC}$	0,032 м <sup>3</sup>	0,036 м <sup>3</sup>	0,041 м <sup>3</sup>	0,045 м <sup>3</sup>	0,050 м <sup>3</sup>
Маса усіх рухомих деталей машини $m_D$	49 кг	51 кг	52,6 кг	54,0 кг	55,5 кг
Кутова швидкість ведучого валу машини $\omega_{ведч.}$	3,3 с <sup>-1</sup> (32 об/хв)				



шатуна 8 може виконувати не лише обертальне переміщення, а ще й додаткове зворотно-поступальне переміщення вздовж напрямних 9, які виконані на циліндричній поверхні проміжного шатуна 8, у результаті чого можна варіювати відстань між протилежними торцями проміжного шатуна (робочої ємкості), цим самим впливати на зміну інтенсивності виконання відповідних галтувальних технологічних операцій.

Далі виконували дослідження, як зміна  $l_{ш(ПРОМ)}$  впливала на максимальні значення реакцій в усіх кінематичних парах машини, а також за досягнення якої міжосьової відстані проміжного шатуна  $l_{ш(ПРОМ)}$  (утворюється між осями кріплення ведучого та веденого шатунів) реакції в кінематичних парах машини будуть перевищувати попередньо визначені в роботі [11, с. 15–17] максимальні значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини. Силowe дослідження проводилося із використанням САПР SolidWorks-2016. У САПР SolidWorks-2016 було сконструйовано модель машини зі змінним параметром – довжиною проміжного шатуна (робочої ємкості). Було утворено п'ять робочих ємностей із різною довжиною. Для кожної довжини проміжного шатуна (робочої ємкості) відповідним був коефіцієнт  $\Delta$  (1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0), який раніше вже був запропонований у роботі [5, с. 87] та характеризує відношення міжосьової відстані проміжного шатуна до міжосьової відстані ведучого чи веденого шатуна машини:  $l_{ш(ПРОМ)} / l_{ш(В)}$ . Таким чином, визначали реакції у всіх кінематичних парах машини із застосуванням проміжного шатуна (робочої ємкості) різної довжини.

Кінетостатичне дослідження виконувалося під час роботи моделі машини на холостому ході (без завантаженого робочого середовища) за кутової швидкості ведучого валу  $3,3 \text{ с}^{-1}$ , оскільки попередні результати силового дослідження «базової» конструкції машини [11, с. 15–17] показали, що усі значення реакцій у кінематичних парах машини під час її роботи як на робочому ході, так і на холостому ході будуть пропорційно відрізнятися на однакове значення для будь-якого положення рухомих ланок (кута повороту ведучого валу машини).

Зазначена вище кутова швидкість ведучого валу для цього типорозміру машини є граничною під час виконання різного роду галтувальних технологічних операцій, вона буде викликати виникнення найбільших інерційних навантажень у кінематичних парах просторового механізму машини.

Також визначали міжосьову відстань проміжного шатуна, подальше збільшення якої буде призводити до такого приросту реакцій у кінематичних парах машини, коли вони стануть перевищувати значення реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини, а отже, використання такої конструкції машини буде нераціональним. Схематичне зображення векторів реакцій в усіх кінематичних парах просторового шарнірного механізму розробленої конструкції машини із кінематичною парою четвертого класу представлено на рис. 2.

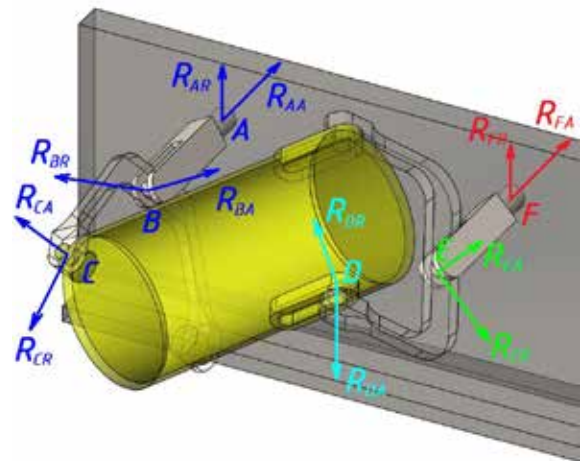


Рис. 2. Схема реакцій у кінематичних парах просторового механізму машини з кінематичною парою четвертого класу

Визначали максимальні значення реакцій  $R$  у п'яти обертальних кінематичних парах п'ятого класу та одній кінематичній парі четвертого класу. Значення всіх реакцій були поділені на дві складові частини: радіальну та осьову:  $R_{AA}$  – осьова складова частина реакції в кінематичній парі «станина – ведучий вал»;  $R_{AR}$  – радіальна складова частина реакції в кінематичній парі «станина – ведучий вал»;  $R_{BA}$  – осьова складова частина реакції в кінематичній парі «ведучий вал – ведучий шатун»;  $R_{BR}$  – радіальна складова частина реакції в кінематичній парі «ведучий вал – ведучий шатун»;  $R_{CA}$  – осьова складова частина реакції в кінематичній парі «ведучий шатун – проміжний шатун»;  $R_{CR}$  – радіальна складова частина реакції в кінематичній парі «ведучий шатун – проміжний шатун»;  $R_{DA}$  – осьова складова частина реакції в кінематичній парі четвертого класу «проміжний шатун – ведений шатун»;  $R_{DR}$  – радіальна складова частина реакції в кінематичній парі четвертого класу «проміжний шатун – ведений шатун»;  $R_{EA}$  – осьова складова частина реакції в кінематичній



парі «ведений шатун – ведений вал»;  $R_{ER}$  – радіальна складова частина реакції в кінематичній парі «ведений шатун – ведений вал»;  $R_{FA}$  – осьова складова частина реакції в кінематичній парі «ведений вал – станина;  $R_{FR}$  – радіальна складова частина реакції в кінематичній парі «ведений вал – станина».

У таблиці 2 представлено визначені за допомогою САПР SolidWorks максимальні значення реакцій у кінематичних парах машини залежно від зміни коефіцієнта  $\Delta$ , а також попередньо з’ясовані [11, с. 15–17] значення реакцій у відповідних кінематичних парах просторового механізму «базової» конструкції машини, що відповідає коефіцієнту  $\Delta=1$ .

На основі наведених у таблиці 2 результатів кінетостатичного дослідження було побудовано графіки залежності максимальних значень реакцій у кінематичних парах просторового механізму

машини із кінематичною парою четвертого класу від зміни коефіцієнта  $\Delta$ , які наведені на рис. 3 (радіальні складові частини реакцій) та рис. 4 (осьові складові частини реакцій).

У конструкції машини із кінематичною парою четвертого класу при коефіцієнтах  $\Delta=1,2$  та  $\Delta=1,4$  максимальні значення реакцій практично у всіх кінематичних парах стали дещо меншими щодо максимальних значень реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини. При коефіцієнті  $\Delta=1,6$  вже більша половина максимальних значень реакцій у кінематичних парах досліджуваної конструкції машини вже значно перевищила максимальні значення реакцій, що виникають у кінематичних парах «базової» конструкції машини. Максимальне значення реакції  $R_{FA}$  у два рази стало більше за максимальне значення реакції в аналогічній кінематичній парі «базової» конструкції машини.

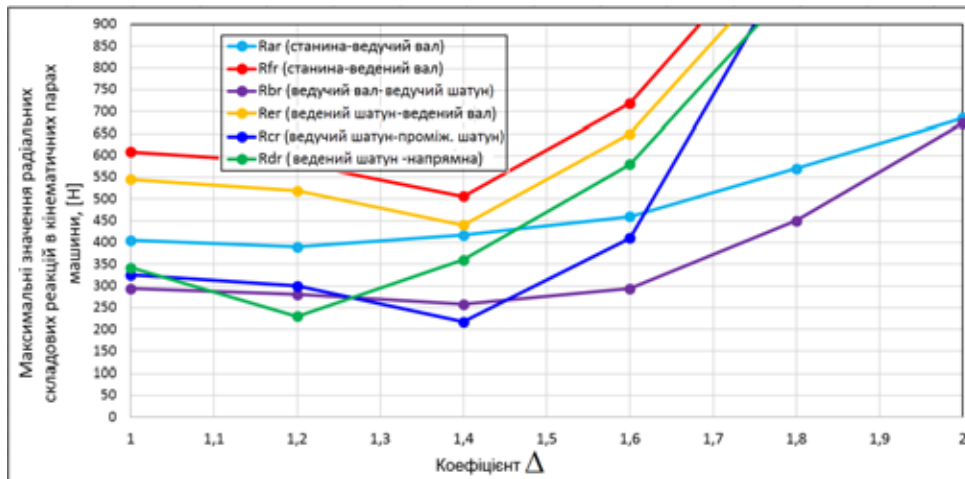


Рис. 3. Графік залежності максимальних значень радіальних реакцій у кінематичних парах просторового механізму від зміни коефіцієнта  $\Delta$

Таблиця 2

		Коефіцієнт $\Delta$ , що характеризує відношення $l_{ш(ПРОМ)} / l_{ш(В)}$					
		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Значення реакцій у кінематичних парах машини під час її роботи на холостому ході	$R_{AA}$ , [Н]	88	98	138	195	420	593
	$R_{FA}$ , [Н]	68	96	144	218	480	660
	$R_{AR}$ , [Н]	405	390	417	460	570	685
	$R_{FR}$ , [Н]	608	582	506	719	1150	1598
	$R_{BA}$ , [Н]	198	123	120	123	164	192
	$R_{EA}$ , [Н]	124	90	118	168	258	370
	$R_{BR}$ , [Н]	294	280	258	294	450	674
	$R_{ER}$ , [Н]	545	519	440	650	1070	1485
	$R_{CA}$ , [Н]	95	79	91	167	278	405
	$R_{DA}$ , [Н]	194	180	145	125	133	198
	$R_{CR}$ , [Н]	325	300	217	410	1065	1310
	$R_{DR}$ , [Н]	342	230	360	580	995	1418

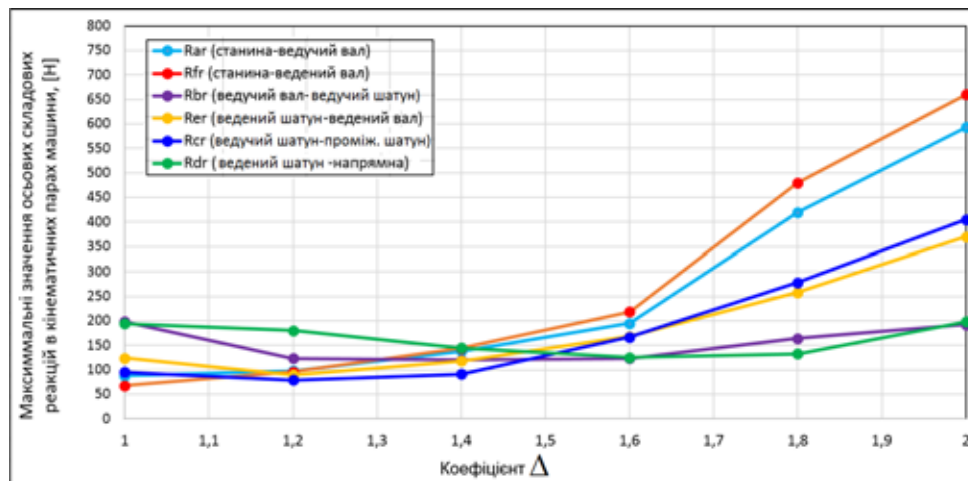


Рис. 4. Графік залежності максимальних значень осевих реакцій у кінематичних парах просторового механізму від зміни коефіцієнта  $\Delta$

**Висновки.** Проведено кінетостатичне дослідження машини для обробки деталей із кінематичною парою четвертого класу, визначено реакції у п'яти обертальних кінематичних парах п'ятого класу та одній кінематичній парі четвертого класу просторового шарнірного механізму машини за допомогою САПР SolidWorks.

Досліджено вплив зміни відстані між протилежними торцями робочої ємності, який виражається коефіцієнтом  $\Delta$ , на приріст макси-

мальних значень реакцій у кінематичних парах машини.

Встановлено, що досліджувану конструкцію машини раціонально використовувати в діапазоні зміни коефіцієнта  $\Delta = [1,0-1,5]$ . При коефіцієнті  $\Delta$ , що дорівнює 1,6, спостерігалася значне збільшення максимальних значень більшості реакцій порівняно з максимальними значеннями реакцій у кінематичних парах «базової» конструкції машини.

#### Список літератури:

1. 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.
2. Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klaptsov Y.V., Malyshev V.V. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. № 2. P. 24–32.
3. Бурмістенков О.П. Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості : монографія / Під заг. ред. В.П. Коновала. Хмельницький : ХНУ, 2007. 255 с.
4. Marigo M., Cairns D. L., Davies M., Ingram A., Stitt E. H. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part B: Investigation of Flow and Mixing in the Turbula mixer. *Powder Technology*. 2011. Vol. 212. P. 17–24.
5. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Машини зі складним рухом робочих ємностей для обробки полімерних деталей: монографія. Київ: Університет «Україна», 2018. 228 с.
6. Zalyubovskii M.G., Panasyuk I.V. On the study of the basic design parameters of a seven-link Spatial mechanism of a part processing machine. *International Applied Mechanics*, 2020. 56, issue 1, 54–64.
7. Решетов Л.Н. Конструирование рациональных механизмов. Изд. 2-е, переработ. и доп. Москва : Машиностроение, 1972. 256 с.
8. Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Yu.I., Malyshev V.V. Synthesis and research of the tumbling machine spatial mechanism. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No. 178, issue 4. P. 69–75.
9. Willy A. Bachofen (WAB): сайт Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. – 2020. URL: <https://www.wab-group.com/en/> (дата відвідування: 08.12.2020).
10. Antonyuk E.Ya., Sakhamov V.A., Koval N.I. Dynamic system of an engine with spatially rocking links: a mathematical model. *International Applied Mechanics*, 2010, 46, No. 9, P. 1039–1049.

11. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Силове дослідження просторового шестиланкового механізму машини для обробки деталей (частина 1: дослідження при роботі машини на холостому ході). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 5, том 31 (70). С. 13–18.

12. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В. Силове дослідження просторового семиланкового механізму машини для обробки деталей. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2020. № 4. С. 127–133.

#### **Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Malyshev V.V. MACHINE FOR PROCESSING PARTS WITH A KINEMATIC STEAM OF THE FOURTH CLASS – KINETOSTATIC RESEARCH**

*Various types of equipment are used to implement the finishing processes of finishing and polishing of small metal and polymer parts: vibration machines and machines with rotating containers, spindle and brush machines, as well as machines with complex spatial movement of working containers. The most promising type of tumbling equipment are machines with a complex spatial movement of working containers. The use of this type of equipment leads to a significant increase in the productivity of finishing finishing and stripping operations, which is due to the intensification of the movement of the working array inside the tanks. Known are various types of machines with complex spatial movement of working containers with different design and technological features. Each type of machine with a complex spatial movement of working containers requires detailed research, including kinetostatic research. With the help of the SolidWorks computer-aided design system, 3D modeling and further kinetostatic research of a machine for processing parts with a kinematic pair of the fourth class was carried out, which consists in determining and analyzing the reactions in all kinematic pairs of a spatial statically determined hinge mechanism of the machine. The relationship between the change in the center distance of the intermediate connecting rod (working capacity) and the maximum values of the reactions in the kinematic pairs of the machine has been established. The maximum values of the axial and radial components of the reactions in each kinematic pair of the spatial mechanism increased with an increase in the center distance of the intermediate connecting rod. The rational range of variation by the center distance of the intermediate connecting rod (working capacity) has been determined, which ensures the formation of the lowest reaction values in all kinematic pairs of the spatial hinge mechanism of the machine during its operation at the maximum permissible angular velocity of the drive shaft. The obtained research results can be useful in the design of appropriate tumbling equipment with containers that perform complex spatial motion.*

**Key words:** *kinematic pair of the fourth class, spatial hinge mechanism, tumbling, finishing technological operations.*

**Кутковецька Т.О.**

Уманський національний університет садівництва

## ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЗЕРНОВИХ ПНЕВМАТИЧНИХ СІВАЛОК ІЗ ЦЕНТРАЛЬНОЮ РОЗПОДІЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ

*У статті проведені дослідження щодо тенденцій розвитку пневматичних зернових сівалок із центральною розподільною системою, які є найбільш перспективними, тому що за рахунок одного загального бункера і пневматичної розподільної системи дозволяють знизити витрати праці до 30% і збільшити продуктивність посівного агрегату до 25%.*

*Наведено фактори, що впливають на нерівномірність розподілу посівного матеріалу у пневматичних зернових сівалках центрального дозування. Загалом процес висіву насіння пневматичною зерною сівалкою включає кілька технологічних операцій, кожна з яких впливає на кінцеву якість виконання посіву. Рівномірний розподіл посівного матеріалу по площі істотно впливає на урожайність оброблюваної культури. Фізико-механічні властивості насіння, що висівається – це основні показники, які визначають технологічний процес пневматичних зернових сівалок центрального дозування. Також наведено чотири основні схеми розподільних систем пневматичних зернових сівалок, їх переваги і недоліки. Усі представлені схеми розподільних систем пневматичних зернових сівалок включають в себе вентилятор, розподільні пристрої, дозатори насіння і пристрої для введення насіння в повітряний потік.*

*Найбільш ефективними є схеми загального та групового дозування насіння, які складаються з одного або кількох високопродуктивних дозаторів, одно- або багатоступінчастої системи дозування насіння. У результаті проведених досліджень визначено, що для підвищення урожайності зернових культур необхідно рівномірно розподіляти насіння по глибині і по площі росту рослин. Пневматичні зернові сівалки є найбільш перспективними, щоб досягти рівномірності розподілу насіння. Тому для підвищення якісних показників роботи пневматичних зернових сівалок необхідно в їхніх конструкціях використовувати центральні розподільні системи, що дозволяють знизити нерівномірність розподілу насіння між насіннепроводами і по площі.*

**Ключові слова:** пневматична зернова сівалка, розподільні системи, дозатори насіння, повітряний потік, технологічний процес, урожайність культур.

**Постановка проблеми.** Нині в Україні понад 60 млн га землі, з них 42,7 млн га (понад 70%) – це земля сільськогосподарського призначення. Посівна площа сільськогосподарських культур становить 27,7 млн га. Від якісного і своєчасного посіву залежить урожайність оброблюваних сільськогосподарських культур. Тому Україна повинна забезпечити свою потребу в посівних машинах нового покоління, відродивши їх власне виробництво на основі новітніх технологій.

Підвищення урожайності сільськогосподарських культур – це системна задача, яка виконується за рахунок виведення нових високоврожайних сортів, розробки нових технологій обробітку, застосування добрив. Серед наведених чинників важливе місце займає розробка сучасних посівних машин, які будуть на високому якісному рівні проводити посів. При незмінних посівних площах збільшення виробництва зерна можливе за рахунок підвищення урожайності і зниження його втрат при посіві та збиранні. Найбільш пер-

спективними є пневматичні зернові сівалки, які за рахунок одного загального бункера і пневматичної розподільної системи дозволять знизити витрати праці до 30% і збільшити продуктивність посівного агрегату до 25%.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенню питань щодо конструкцій пневматичних зернових сівалок присвячені роботи В.В. Ауліна [2, с. 28], Д.В. Зубенка [7, с. 80], Н.І. Любушка [6, с. 88], А.О. Панкова [3, с. 56], Ю.Л. Салапури [7, с. 78] та інших. Проте існує багато питань, що стосуються пристрою центральної розподільчої системи пневматичної зернової сівалки. Тому проведення досліджень викладеної вище проблеми наразі є дуже актуальним.

**Постановка завдання** полягає в теоретичному обґрунтуванні тенденцій розвитку зернових пневматичних сівалок із центральною розподільною системою.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У сучасному господарюванні при вирощуванні

сільськогосподарських культур все більшого значення набувають сучасні посівні машини різних модернізацій як вітчизняного, так і зарубіжного виробництва. Такі сівалки повинні мати високі показники якості: стійкість налаштувань, точність висіву, забезпечувати безпеку і ергономічність, можливість їх модернізації.

Також сучасні посівні машини повинні володіти високими експлуатаційними показниками продуктивності при дотриманні агротехнічних вимог. Нині спостерігається тенденція до переоснащення рослинницьких господарств високопродуктивними енергетичними засобами, що дозволяють знизити трудові витрати виробництва. Більш потужні енергетичні засоби агрегуються із сільськогосподарськими машинами і знаряддями, здатними найбільш повно завантажити їх. Здебільшого це широкозахватні, комбіновані машини, які виконують кілька технологічних операцій за один прохід агрегату [1, с. 7; 10, с. 48].

Процес висіву насіння пневматичною зерною сівалкою включає такі технологічні операції: створення повітряного потоку в пневмопроводах; вдавнення в повітряний потік насіння, дозованого висівним апаратом із бункера; поділ зерно-повітряної суміші на кілька потоків розподільним пристроєм; рух насіння по насіннепроводах до сошників; вкладення насіння в борозну, відкрити сошником; закриття борозни й коткування посівів. Кожна з цих технологічних операцій впливає на кінцеву якість виконання посіву.

Рівномірний розподіл посівного матеріалу на площі істотно впливає на урожайність оброблюваної культури. Нерівномірність розподілу посівного матеріалу в пневматичних зернових сівалках центрального дозування залежить від низки факторів (рис. 1) [7, с. 83].

Фізико-механічні властивості насіння, що висівається, – це основні показники, які визначають технологічний процес пневматичних зернових сівалок центрального дозування. Розподільна система зернової пневматичної сівалки – це сукуп-

ність вузлів машини, головними з яких є дозатор насіння і його привід, пневматична система з розподільниками насіння й вентилятором. Дозатор насіння повинен забезпечувати безперервну подачу насіння з бункера у пневматичну систему посівної машини. Привід дозатора насіння проводиться від коліс, що опираються на ґрунт або від гідравлічних двигунів. Пневматична система включає в себе основний пневмопровід, тобто колектор, який відводить і підводить пневмопроводи, насіннепроводи та розподільники насіння. Вона призначена для перенесення і рівномірного розподілу зерно-повітряної суміші по насіннепроводах. Вентилятор слугує для створення повітряного потоку, що допомагає транспортувати посівний матеріал.

Технологічний процес роботи пневматичної зернової сівалки можна розбити на три основні операції:

- 1) дозування насіння;
- 2) транспортування зерно-повітряної суміші;
- 3) розподіл насіння по насіннепроводах.

Виділяють чотири основні схеми (рис. 2) розподільних систем пневматичних зернових сівалок [4, с. 25; 8, с. 66]:

- 1) безступінчаста індивідуального дозування;
- 2) двоступенева групового дозування;
- 3) одноступенева загального дозування;
- 4) двоступенева загального дозування.

Усі представлені схеми розподільних систем пневматичних зернових сівалок включають в себе вентилятори, розподільні пристрої, дозатори насіння і пристрої для введення насіння в повітряний потік.

У сівалках із безступінчастою схемою індивідуального дозування насіння (рис. 2, а) кількість дозаторів дорівнює кількості сошників. Їх принципова відмінність від звичайних зернових сівалок полягає у тому, що насіння від кожного висівного апарату транспортується повітряним потоком, а також наявністю у них одного загального бункера. Робота таких висівних систем обме-

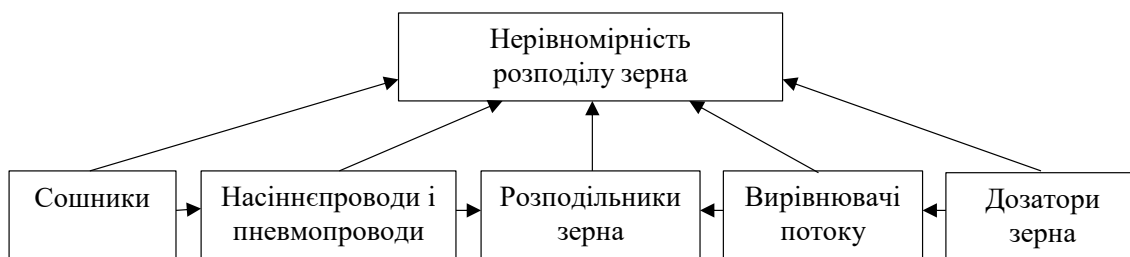
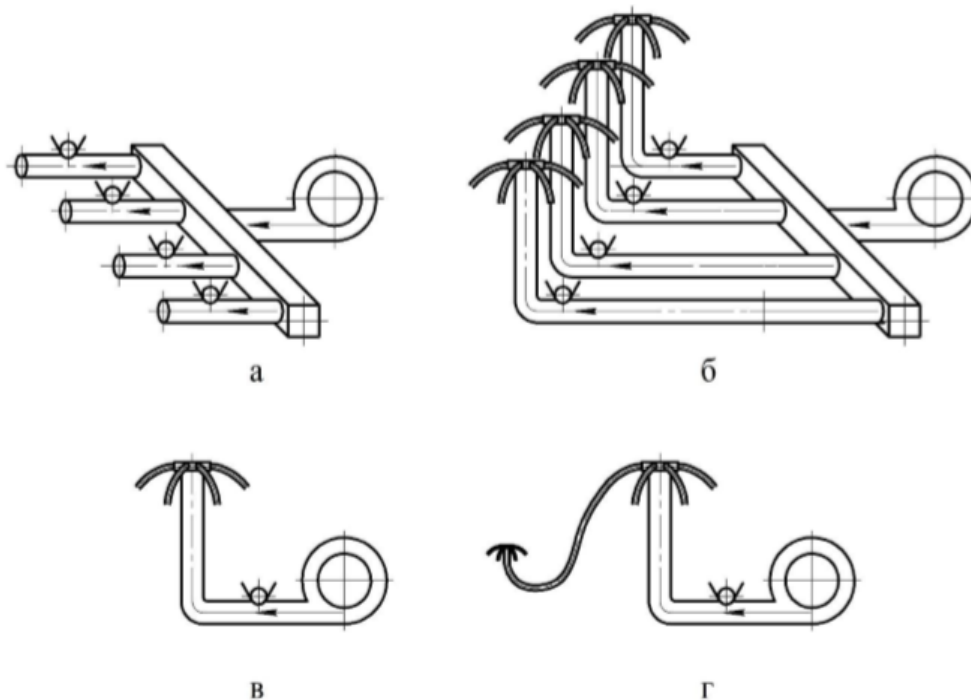


Рис. 1. Фактори, що впливають на нерівномірність розподілу посівного матеріалу у пневматичних зернових сівалках



**Рис. 2. Схеми розподільних систем пневматичних зернових сівалок:**

*а – безступінчаста індивідуального дозування; б – двоступенева групового дозування; в – одноступенева загального дозування; г – двоступенева загального дозування.*

жена кутом нахилу насіннепроводів, що обмежує ширину захвату посівної машини до 6 м [9, с. 27].

Найбільш ефективними є схеми загального та групового дозування насіння (рис. 2 б, в, г). Вони складаються з одного або кількох високопродуктивних дозаторів, одно- або багаступінчастої системи дозування насіння.

Пневматичні зернові сівалки з одноступінчастою схемою загального дозування насіння працюють із малою кількістю сошників, тому ширина їх захвату обмежена 6 м. При більшій ширині захвату застосовують двоступеневу схему групового дозування (рис. 2, б) і двоступеневу схему загального дозування (рис. 2, г).

Двоступенева схема групового дозування відрізняється тим, що повітряний потік від вентилятора колектором розділяється на кілька окремих пневмопроводів, які мають власний дозатор і розподільники насіння.

Двоступенева схема загального дозування має один загальний дозатор і пневмопровід, з'єднаний із розподільником насіння першого ступеня, а відводять його патрубки, з'єднані з розподільниками насіння другого ступеня. Причому розподільники першого та другого ступенів мають ідентичну конструкцію, а кількість розподільників другого ступеня дорівнює кількості відповідних патрубків розподільника першого ступеня [9, с. 30].

Одним з основних недоліків пневматичних зернових сівалок, який знижує їх ефективність, є нерівномірний розподіл насіння по насіннепроводах, що перевищує у деяких зразків 15% при агротехнічній нормі 6-8% [4, с. 46]. Нерівномірний розподіл насіння по ширині захвату посівної машини призводить до перевитрати посівного матеріалу, зниження урожайності та до розростання бур'янів.

Пневматичні зернові сівалки, в яких реалізований принцип центрального дозування насіння, випускаються у великому обсязі виробниками США, Канади та Європи. Всі сучасні посівні машини мають оригінальні конструктивні елементи та принципи протікання технологічного процесу. Наразі відсутня чітка термінологія і класифікація елементів конструкцій і систем пневматичних зернових сівалок. Причиною відсутності єдиної термінології є те, що фірми, які виробляють посівну техніку, застосовують різну класифікацію та найменування своєї продукції. Відсутність загальноприйнятої термінології і класифікації створює певні труднощі при проведенні наукових досліджень в області посіву, а також при виборі посівної техніки сільськогосподарськими товаровиробниками, тому класифікація пневматичних зернових сівалок має наукову і практичну значимість [5, с. 48].

**Висновки.** Таким чином, для підвищення урожайності зернових культур необхідно рівномірно розподіляти насіння по глибині і по площі росту рослин. Пневматичні зернові сівалки є найбільш перспективним напрямом розвитку роздільно агрегатних посівних машин. Для підви-

щення якісних показників роботи пневматичних зернових сівалок необхідно в їхніх конструкціях використовувати центральні розподільні системи, що дозволяють знизити нерівномірність розподілу насіння між насіннепроводами і здійснювати більш рівномірний розподіл насіння по площі.

#### Список літератури:

1. Астахов В.С. Посевная техника: анализ и перспективы развития. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1999. № 1. С. 6–9.
2. Аулин В.В., Панков А.А. Исследование формирования исходного потока семян пневмодозатором пунктирного высева. *Вісник інженерної академії України*. 2016. № 2. С. 27–32.
3. Аулін В.В., Черновол М.І., Панков А.О. Напрями розвитку висіваючих систем. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2016. Вип. № 3 (102). С. 54–58.
4. Кленин Н.И., Киселев С.Н., Левшин А.Г. Сельскохозяйственные машины. Москва : Колос, 2008. 652 с.
5. Крючин Н.П. Посевные машины. Особенности конструкций и тенденции развития. Самара : РИЦ ГСХА, 2009. 176 с.
6. Любушко Н.И., Зволинский В.Н. Развитие конструкций распределительных систем для пневматических сеялок централизованного высева. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1999. № 2. С. 84–92.
7. Салапура Ю.Л., Чеботарев В.П., Зубенко Д.В. Исследования пневматической высевающей системы централизованного дозирования посевного материала. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2015. Випуск № 1 (100). С. 78–85.
8. Сенгюров А.С. Распределение семян в пневматических централизованных высевающих системах. *Технологические основы механизации обработки почвы и посева сельскохозяйственных культур комбинированными машинами*. 1987. С. 63–68.
9. Угорчук А.В., Гришин А.А. Характеристики основных составляющих пневматических централизованных высевающих систем. *Технологии и средства механизации полеводства*. 2002. С. 28–31.
10. Шаршуков И.А. Сравнительная энергетическая оценка пневматических высевающих систем различного типа. *Моделирование и прогнозирование аграрных энергосберегающих процессов и технологий*. Материалы Международной научно-технической конференции. Минск, 1998. С. 48–51.

#### **Kutkovetska T.O. THE DEVELOPMENT TRENDS OF PNEUMATIC GRAIN DRILLS WITH CENTRAL DISTRIBUTION SYSTEM**

*The article deals with the development trends of pneumatic grain drills with a central distribution system, which are the most promising, because due to one common hopper and pneumatic distribution system can reduce labor costs up to 30% and increase the productivity of the sowing unit to 25%.*

*The factors influencing the uneven distribution of seed in pneumatic grain drills with central dosing are given. The process of sowing seeds with a pneumatic grain drill involves several technological operations, each of which affects the final quality of sowing. Uniform distribution of sowing material over the area significantly affects the yield of the cultivated crop. The physical and mechanical properties of sown seeds are the main indicators that determine the technological process of pneumatic grain drills with central dosing. The four main schemes of distribution systems of pneumatic grain drills and their advantages and disadvantages are also given.*

*All the presented schemes of distribution systems of pneumatic grain drills include fans, distributors, seed dispensers and devices for introduction of seeds into an air stream. The most effective are the schemes of general and group seed dosing, which consist of one or more high-yield dispensers, single- or multi-stage seed dosing system. Pneumatic grain drills are the most promising to achieve uniform seed distribution. Therefore, in order to improve the quality of pneumatic grain drills, it is necessary to use central distribution systems in their designs, which reduce the uneven distribution of seeds between the seed lines and the area.*

**Key words:** *pneumatic grain drill, distribution systems, seed dispensers, air flow, technological process, crop yield.*



**Луцко Л.І.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## БАГАТОШАРОВІ ДРУКОВАНІ ПЛАТИ ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

*У більшості спецтехніки до недавнього часу застосовували двохсторонні друковані плати. Проте останнім часом зростає складність наших пристроїв, збільшилася функціональна насиченість, підвищилась щільність монтажу, докорінно змінилася елементна база радіоелементів, зменшилась вага і обсяг спецтехніки. У зв'язку з цим виникла необхідність виготовлення багатошарових друкованих плат. Саме такій темі присвячена ця стаття.*

*У роботі розглянуті ключові параметри і терміни багатошарових друкованих плат, охарактеризовані додаткові переваги поверхневого монтажу, а також недоліки багатошарових друкованих плат. До недоліків можна віднести їх обмежену ремонтпридатність, а також складність внесення змін до конструкції готових друкованих плат.*

*У статті проаналізовані основні методи виготовлення друкованих плат, щоб можна було підібрати прийнятний для свого випадку метод, оскільки це необхідно для гарантованого забезпечення надійності, якості, безпеки і конкурентоспроможності виробу, який виробляє підприємство-виробник. Тому в процесі виготовлення спецтехніки, щоб запобігти отриманню дефектної продукції, необхідно професійно скомпонувати багатошарову друковану плату в пакеті PCAD із отриманням PCB файлу, в якому відображена уся конструкторська документація для виготовлення деталей плати, складального кресленника, використаного матеріалу заготовок, схеми послідовності з'єднання шарів і необхідного покриття, а також усі технічні вимоги для виготовлення. Після цього слід професійно підібрати необхідний метод.*

*У статті розглянутий приклад чотиришарової друкованої плати, скомпонованої у пакеті PCAD-6 і виготовленої методом металізації наскрізних отворів. Показана схема послідовності з'єднання шарів. При дотриманні усього сказаного вище у нас буде можливість отримати якісну продукцію.*

**Ключові слова:** друкований малюнок, міжшаровий перехід, контактний перехід, технологічний отвір, травлення міді, металізація наскрізних отворів.

**Постановка проблеми** Основною умовою стабільного розвитку та забезпечення конкурентоспроможності підприємств є випуск якісної продукції.

До якості спецтехніки, яка експлуатується в умовах підвищеної вологості (що пришвидшує корозію) при високих або низьких температурах (що створює термоудар) і у вибухонебезпечних середовищах, висуваються особливі вимоги, які потребують впровадження нової, сучасної елементної бази, що призвело до впровадження нових методів виготовлення, зокрема, виготовлення багатошарових друкованих плат.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** Важливим та обов'язковим етапом виготовлення якісної продукції підприємства є виготовлення якісних багатошарових друкованих плат. Цьому питанню присвячено багато теоретичних і практичних досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених. Дослідженням проблемних питань виготовлення багатошарових друкованих

плат займалися вітчизняні науковці Л.А. Яцюк, О.В. Косогін, Д.Ю. Ущатовський, О.В. Ліночева, Ю.Ф. Фатєєв [1, с. 249–250]; Н.В. Черкас [5, с. 11–13]; О.П. Вітюк, О.К. Колесницький, С.І. Кормановський, В.Н. Панченко [6, с. 9–11].

У їхніх працях описані переваги та недоліки багатошарових друкованих плат. Є багато інформації про використання діелектричної основи друкованих плат. Однак попри велику кількість наукових публікацій, недостатня увага приділена практичним дослідженням. Усі ці фактори зумовлюють потребу подальших досліджень проблем проектування та виготовлення багатошарових друкованих плат, враховуючи типи виробництва та особливості виготовлення спецтехніки.

**Постановка завдання** Метою цієї статті є довести доцільність виготовлення багатошарових друкованих плат (далі – БДП), навчитися підбирати основний метод виготовлення БДП, оскільки багатошарові друковані плати характеризуються підвищеною надійністю і щільністю монтажу,



стійкістю до механічних і кліматичних впливів, зменшенням розмірів і числа контактів, підвищеною стійкістю до кліматичного і механічного впливів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Якість спецтехніки, яку виробляє підприємство-виробник, є запорукою тривалої та безаварійної її експлуатації, адже вироби спецтехніки працюють в екстремальних умовах. Друковані плати теж повинні бути якісними і безаварійними.

Друкована плата являє собою пластину, виконану з діелектричного матеріалу (гетинакс / текстоліт / склотекстоліт) із нанесеними на її поверхню електропровідними смугами для забезпечення контакту.

Зростаюча вимога до зменшення ваги і обсягу радіоапаратури призвела до необхідності проектувати і виготовляти досить складні пристрої, для яких обов'язкова висока щільність при монтажі. Це зумовило необхідність поліпшення як конструкції, так і технології з'єднань деталей і функціональних вузлів, викликало гостру необхідність запровадження інновацій у конструкцію друкованих плат. Саме тому останнім часом БДП набули широкого поширення у сфері виробництва радіоелектронних виробів.

БДП складаються із розташованих поперемінно шарів ізоляційного матеріалу і провідного рисунка, з'єднаних клейовими прокладками у процесі пресування в монолітну структуру. Електричний зв'язок між окремими провідними шарами найчастіше виконується хіміко-гальванічною металізацією. Порівняно з одношаровими платами, БДП характеризуються підвищеною надійністю і щільністю монтажу, стійкістю до механічних і кліматичних впливів, зменшенням розмірів і числа контактів. Проте велика трудомісткість виготовлення, необхідність ретельного контролю на всіх операціях, складність технологічного обладнання і висока вартість зумовлюють застосування БДП здебільшого при виробництві спецтехніки, електронно-обчислювальної, авіаційної та космічної апаратури.

БДП призначені для розміщення на них мікросхем із великою кількістю виводів у разі, якщо є неможливим розміщення провідників на двосторонніх платах. По суті, БДП складається з низки накладених і склеєних одиночних друкованих шарів, в яких утворені з'єднувальні провідники для передачі сигналів, провідні поверхні для підведення напруги живлення, прокладання земельних ланцюгів, контактні площинки, перехідні отвори, екрани. Часто в структуру багатошарової

плати включають для охолодження теплопровідний матеріал.

Кількість шарів плати залежить від області призначення електротехнічного виробу та його функціональності. Однак є і обмеження: розмір БДП не повинен бути більше 150x180 мм.

БДП характеризуються такими основними параметрами і термінами:

1) друкований малюнок – електропровідний шар, нанесений на діелектричну підставку;

2) міжшаровий перехід – контактне з'єднання між шарами;

3) технологічний отвір – наскрізний отвір, необхідний для організації процесу виробництва БДП;

4) контактний перехід – ділянка з металевим покриттям, необхідна для з'єднання контактних провідників, розташованих у різних шарах БДП.

Зберігаючи усі переваги друкованого монтажу, БДП мають додаткові переваги:

– Більш висока питома щільність друкованих провідників і контактних площинок (20 і більше шарів).

– Зменшення довжини провідників, що забезпечує значне підвищення швидкодії (наприклад, швидкість обробки даних в ЕОМ).

– Можливість екранування ланцюгів змінного струму.

– Більш висока стабільність параметрів друкованих провідників під впливом зовнішніх умов.

Недоліки БДП:

– Більш жорсткі допуски на розміри порівняно з односторонньою та двосторонньою друкованою платою.

– Велика трудомісткість проектування і виготовлення.

– Застосування спеціального технологічного обладнання.

– Ретельний контроль усіх операцій.

– Висока вартість і низька ремонтпридатність.

Основні способи виготовлення БДП класифікують за методом створення електричних міжшарових сполук. У першій групі методів електричний зв'язок між провідниками, розташованими на різних шарах плати, здійснюється за допомогою механічних деталей: пістонів, штифтів, заклепок, пружних пелюсток.

Є БДП, які виготовляються із кількох двосторонніх друкованих плат шляхом пресування. В отвори вставляються попередньо облужені штифти, які потім під дією електричного струму, що проходить через штифт, розігріваються,

утворюючи за допомогою припою електричне з'єднання із друкованими провідниками. В отвори можуть вставлятися також заклепки, пістони, які обслужуються по торцях і розвальцьовуються. З'єднання можуть відбортовувати контактні площинки пістоном, що зменшує розміри пакету. Ці методи дуже трудомісткі, погано піддаються автоматизації і не забезпечують високої якості міжшарових сполук.

#### Методи виготовлення.

**1. Метод виступаючих виводів** характеризується тим, що при його здійсненні міжшарові сполуки утворюються за рахунок виводів, виконаних зі смужок мідної фольги, виступаючих із кожного друкованого шару, і проходять через перфоровані отвори в діелектричних міжшарових прокладках. Виводи відгинаються на зовнішню сторону БДП і закріплюються пайкою у спеціальних колодках.

При цьому методі використовується більш товста мідна фольга (до 80 мкм), плати допускають установку тільки елементів із планарними виводами. Кількість шарів не перевищує 20.

Переваги методу: висока жорсткість і надійність міжшарових сполук.

Недоліки: складність механізації процесу розведення виступаючих виводів і їх закріплення на платі, а також установки навісних елементів.

**2. Метод відкритих контактних площинок** заснований на створенні електричних міжшарових сполук за допомогою виводів навісних елементів або перемичок через технологічні отвори, що забезпечують доступ до контактних площинок.

При цьому методі в шарах вирубуються отвори: для штирових виводів круглі, для планарних – прямокутні. Для збільшення площі контакту діаметр площинок роблять більше діаметра отворів.

Переваги методу: ремонтпридатність, оскільки припускається перепайка виводів радіоелементів.

Кількість шарів: до 12.

Недоліки методу: можливість попадання клею на контактні площинки при склеюванні шарів і трудомісткість його видалення скальпелем; труднощі автоматизації процесу пайки виводів у заглибинах; відсутність електричного зв'язку між шарами; низька щільність монтажних з'єднань.

**3. Метод металізації наскрізних отворів** характеризується тим, що збирають пакет з окремих шарів фольгованого діелектрика (зовнішніх – одностороннього, внутрішніх – із готовими друкованими схемами) і міжшарових склеюючих прокладок. Пакет пресують, а міжшарові з'єднання виконують шляхом металізації наскрізних отворів.

Якість плати, виготовленої методом металізації наскрізних отворів, значною мірою залежить від надійності міжшарових сполук – торців контактних площинок із металізованими отворами.

Такий метод є основним і найбільш перспективним у виробництві БДП, оскільки не має обмеження кількості шарів, легко піддається автоматизації і забезпечує найбільшу щільність друкованого монтажу. Він дозволяє виготовляти БДП, придатні для розміщення на них елементів із планарними і штировими виводами. Понад 80% усіх багатошарових друкованих плат, вироблених у світі, виготовляється цим методом.

**4. Метод попарного пресування** характеризується тим, що внутрішні шари БДП виготовляються на одній стороні заготовки із двостороннього фольгованого діелектрика, міжшарові з'єднання – шляхом хіміко-гальванічної металізації отворів у заготовках, отримані шари пресуються, а малюнок на зовнішніх сторонах плати виконується комбінованим позитивним методом.

У такій конструкції БДП немає прямого електричного зв'язку між внутрішніми шарами багатошарової структури, вона здійснюється через зовнішні шари. Складність переходів не дає можливості одержати високу щільність друкованого монтажу. Число шарів БДП – не більше чотирьох. Попарним пресуванням виготовляються БДП, на яких розміщуються навісні елементи із планарними і штировими виводами.

Недоліки методу: низька продуктивність, неможливість отримання великої кількості шарів і високої щільності друкованого монтажу.

**5. Метод пошарового нарощування** характеризується тим, що при його здійсненні міжшарові з'єднання виконують суцільними мідними переходами (стовпчиками міді), розташованими у місцях контактних площинок.

До базових технологічних процесів отримання БДП відноситься пресування пакету, механічна обробка і контроль. Пресування пакету БДП є одним із найважливіших процесів виготовлення БДП, тому що від якості його виконання залежать електричні і механічні характеристики готової БДП.

Пошаровим нарощуванням отримують БДП, на яких розміщують тільки навісні елементи із планарними виводами. Недоліком такого методу є нетехнологічність конструкції, оскільки не можна використовувати фольговані діелектрики і необхідно вести послідовний цикл виготовлення багатошарової структури. Вартість виготовлення такого БДП – висока.

Переваги методу: можливість отримання великого числа шарів (5 і більше) і найнадійніші міжшарові контактні з'єднання.

Приведений приклад чотиришарової друкованої плати, скомп'юнованої у пакеті PCAD-6 із отриманням PCB-файлу. У PCB-файлі є всі дані для виготовлення плати. Таку чотиришарову друковану плату виготовили методом металізації наскрізних отворів.

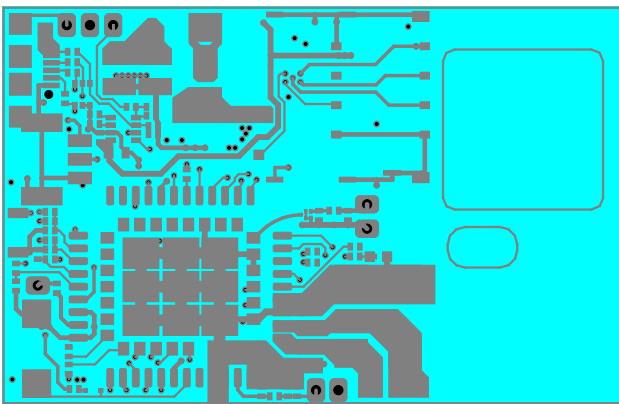
**Схема послідовності з'єднання шарів:**

Матеріал заготовки:

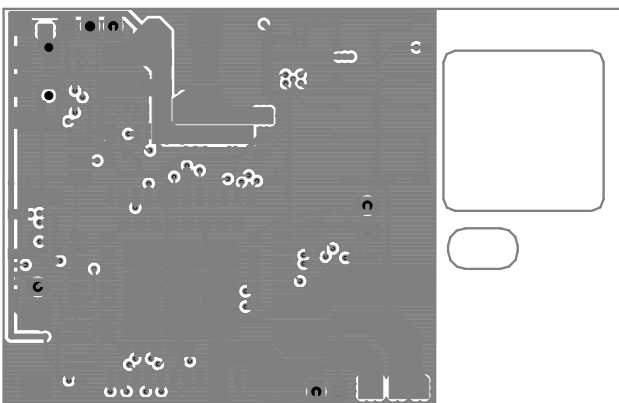
стеклотекстоліт FR-4 fol-k1218/18 Isola.



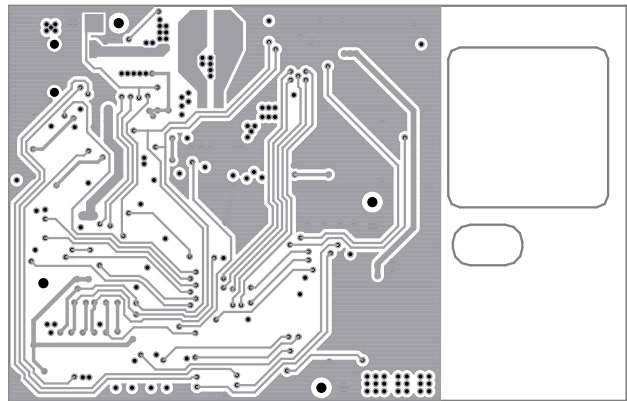
Перший шар: TOP.



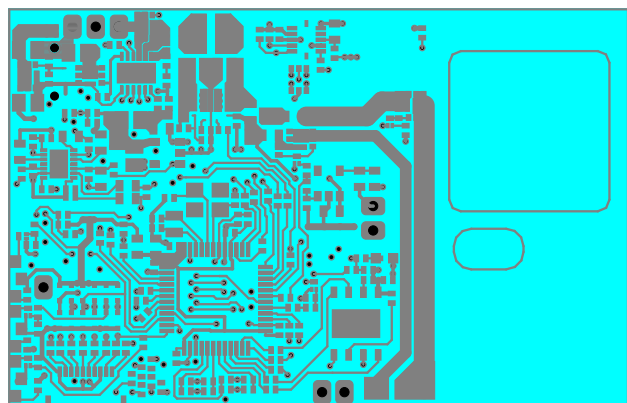
Другий шар: GND.



Третій шар: SignalBot.



Четвертий шар: Bottom.



Із цієї плати видно, наскільки потужні шари земельного ланцюга та напруги живлення. На двосторонній друкованій платі такого досягти не можливо.

**Висновки.** Узагальнюючи зазначене вище, можна зробити висновок, що БДП призначені для розміщення здебільшого мікросхем із великою кількістю виводів. Кількість шарів визначають при поділі електричної схеми на функціональні групи, при цьому бажано, щоб кожна функціональна група розташовувалася на окремому шарі (наприклад, шар із друкованим монтажем ланцюгів живлення, шар із друкованим монтажем нульового потенціалу, шар із друкованим монтажем сигнальних ланцюгів та інші).

Застосування БДП є ефективним методом отримання надійних з'єднань для апаратури з високою щільністю упаковки компонентів. Жоден із основних процесів виготовлення БДП не є особливо важким і не містить будь-яких специфічних джерел ненадійності. Практика свідчить, що у процесі виготовлення спецтехніки впровадження БДП гарантує забезпечення якості, надійності і безпеки спецтехніки, яку виробляє підприємство-виробник.

**Список літератури:**

1. Яцюк Л.А., Косогін О.В., Ущатовський Д.Ю., Лінючева О.В., Фатєєв Ю.Ф. Технологія нанесення неметалевих покриттів і виробництво плат друкованого монтажу : Посібник / НТУ України КПІ. Київ, 2017. С. 249–250.
2. Левін А.П., Сватікова Н.Е. Розрахунок віброміцності конструкції РЕА. М. : МІРЕА, 2003.
3. Ненашев А.П. Конструювання радіоелектронних засобів : Посібник / для радіотехніч. спец. Вузів. Мн. : Висш. шк., 2002. 432 с.
4. Мевіс А.Ф., Несвіжський В.Б., Фефер А.І. Допуски і посадки деталей радіоелектронної апаратури : Довідник / За ред. О.А. Луппова. М. : Радіо і зв'язок, 2004. 152 с.
5. Черкас Н.В. Кількісна оцінка технологічності друкованого вузла : посібник / ELARTU. 2019. С. 11–13.
6. О.П. Вітюк, О.К. Колесницький, С.І. Кормановський, В.Н. Панщенко Виконання креслень електричних схем і друкованих плат : Посібник / Техн. університет Міністерства освіти і науки України. 2001. С. 9–11.

**Lutsko L.I. MULTI-LAYER PRINTED CIRCUIT BOARD AND BASIC METHODS OF THEIR PRODUCTION**

*Most of the special purpose technique used double-sided PCB until recently. But lately the complexity of the devices was increased significantly, the functional density and the mounting density increased as well. The electronic components base has changed fundamentally, that led to reducing of weight and size for the special devices. Because of facts above the new requirements to manufacture have been appeared – the multi-layer boards. So this article is dedicated to the most recent methods of production such PCB.*

*The article does view key parameters and terms of the multi-layer PCBs, lists an additional advantage of the surface mounting and some imperfection of the multi-layer PCBs. Limited repair ability and complexity of design update for the completed product can be attributed to the disadvantage features. Main methods of the production for the multi-layer PCB analysed by the article. The best of methods have to be selected to gain required reliability, quality, security and competitiveness for the production manufacturer.*

*Thus to avoid of defects during the special devices production, the design of PCB should be composed by the most professional engineers. As a result the PCB file from PCAD Software has contain all design documentation to manufacture board parts, compiled drawings, used materials for blanks, the sequence of layers connections and required covering, as well as the technical requirements for the manufacturing process. After the demands above are met the necessary method has to be selected.*

*The article reveals a 4-layer PCB example composed with the PCAD-6 software and manufactured with the metallized through-holes. Sequential scheme of layers connection provided also. The compliance of above does allow to get a quality production.*

**Key words:** *printed circuit board, interlayer transition, contact transition, technological hole, copper etchant (solution), metallization of through-holes.*

УДК 669

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/05>**Трубачев С.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Воробйов М.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ МІЦНОСТІ ТРУБОПРОВОДІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У роботі запропоновано підхід до розрахунку на міцність трубопроводів на основі використання методу скінченних елементів та академічної (безкоштовної) версії програмного комплексу *Abaqus*. Метою роботи є визначення напружено-деформованого стану згинів трубопроводів, побудова алгоритму чисельного моделювання трубопроводів зі згинами та визначення їх умов міцності. Об'єкт дослідження – процеси напружено-деформованого стану згинів трубопроводів. Предмет дослідження – прямокутні (колінні) згини трубопроводів різного радіуса кривизни. Постановка роботи викликана актуальністю завдання розрахунку трубопроводів та фактом того, що в літературі майже відсутні методики розрахунку трубопроводів з урахуванням гнбів на основі трьохвимірних моделей або у точній постановці задачі. Під час розрахунку використовувалась модель сталеві труби з модулем Юнга  $E = 2 \times 10^{11}$  Па, коефіцієнтом Пуассона  $\mu = 0,3$ , густиною  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Діаметр труби дорівнював 220 мм, товщина стінки 7 мм. Згин навантажено внутрішнім тиском  $1,2 \times 10^6$  Па. Побудовані скінченно-елементарні розрахункові сітки для згину труби при різних радіусах кривизни в діапазоні  $0,5 \leq R/D \leq 3$ . Показано, що коефіцієнт концентрації напружень для згину труби має нелінійний характер із значним скачком при значеннях  $R$ , які менші діаметра труби і супроводжуються втратою стійкості (руйнуванням) системи навіть при незначних навантаженнях, критичні значення яких значно зменшуються при відношенні  $R/D < 1$ . Отримана залежність критичного зовнішнього тиску від товщини стінки в діапазоні  $8 \leq D/h \leq 55$  дає можливість інженеру-конструктору під час виконання проектних робіт вибрати відповідний сортамент труб і оцінити умови міцності при їх роботі. Результати, отримані в роботі, можуть бути використані як для розрахунків трубопроводів енергетичного призначення так і для магістральних, міських комунально-мережевих та технологічних трубопроводів в широкому діапазоні варіювання робочих тисків та температур роботи.

**Ключові слова:** згини труб, коефіцієнт концентрації напружень, критичний тиск, напружено-деформований стан, міцність труб, чисельне моделювання.

**Постановка проблеми.** На теплових та атомних електричних станціях і промислових підприємствах відзначається велика різноманітність трубопроводів різного призначення, а їх розрахунок на міцність, жорсткість і стійкість у проектуванні з урахуванням реальних умов експлуатації є актуальною задачею. Слід підкреслити, що в теперішній час небагато наукових робіт присвячено розрахунку трубопроводів з урахуванням згинів на основі трьохвимірних моделей або у точній постановці задачі. Розрахунок трубопроводів, як розрахунок стержневих систем без урахування розподілення напружень у місцях закріплення трубопроводів або в місцях, де існують концентратори напружень, не завжди дають достовірні результати. Це пов'язано, насамперед, зі склад-

ністю математичної постановки задачі. Щоб врахувати всі ці фактори, необхідно застосовувати чисельні методи розрахунку на основі варіаційно-сіткових підходів. У даній роботі пропонується розрахунок трубопроводів з урахуванням згинів, заснований на використанні метода скінчених елементів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Використання трубопроводів пов'язано з великою кількістю особливостей їх технологічного застосування, умов та режимів роботи, а оцінка міцності та ресурсу визначає безпечну і надійну роботу обладнання. Наразі вирішенню цих питань присвячена велика кількість робіт, зокрема, розглядають питання виникнення напружень під час технологічних операцій згинання труб [1; 2],

умови міцності та надійності зварних з'єднань [3; 4], питання довготривалої втоми трубопроводів [5]. Але початкові напруження виникають вже на етапі виготовлення згинів труб, і правильна оцінка напружено-деформованого стану трубопроводу на цьому етапі визначає подальшу надійну експлуатацію трубопроводів.

На сучасному етапі розвитку інженерних підходів до розрахунку на міцність оболонкових елементів більшість чисельних процедур засновані на скінченноелементній методиці розв'язання [6–8], яка вимагає переформування скінченноелементної моделі відповідно до розв'язуваної задачі, тому для зменшення трудовитрат важливо визначити відповідні допущення та вибрати оптимальну розбивкову сітку, яка надалі буде використовуватися в розрахунках. Разом із тим для розв'язання даної задачі чисельно-аналітичних підходів доводиться стикатися із проблемою підсумовування нескінченних рядів і обчислення сингулярних інтегралів [9; 10], що вимагає відповідного задання кількості розрахункових ітерацій.

**Постановка завдання.** Згини трубопроводів – неодмінний елемент їхніх конструкцій. Як і для всього трубопроводу, так і для згину основними параметрами системи є умовний діаметр проходу, умовний тиск, а для згину ще і відносна кривизна. Визначення відповідних умов міцності згинів трубопроводів вимагає відповідного аналізу їх застосування (транспортування різних рідких, газоподібних і сипучих речовин та ін.). Для конкретизації умов роботи трубопроводів відзначимо, що їх класифікують таким чином:

1) магістральні (газопроводи, нафтопроводи, водопроводи);

2) міські комунально-мережні (водопровід, газові мережі, теплофікаційні мережі, каналізаційні мережі);

3) технологічні (внутрізаводські, міжцехові, цехові, обв'язочні; машинні).

Магістральні трубопроводи призначені для транспортування сировини на далекі відстані. Магістральний трубопровід включає в себе споруди з підготовки транспортуючої сировини, лінійну частину, насосні або компресорні і газорозподільні станції. По робочому тиску магістральні газопроводи розподіляють на трубопроводи низького тиску – менше 1,2 МПа, середнього тиску – 1,2 – 1,5 МПа і високого тиску – більше 2,5 МПа.

Міські (сільські) комунально-мережні трубопроводи використовуються для задоволення потреб населення і невеликих промислових підприємств. Газопроводи міського газового гос-

подарства залежно від призначення поділяють на транзитні, розподільючі та розгалужуючі. Транспортування газу по міському газопроводу діючими нормами допускаються за умов робочого тиску менше ніж 1,2 МПа.

Технологічними називають трубопроводи промислових підприємств по яких транспортується сировина, пара, вода, паливо, інші матеріали, що забезпечують виконання технологічного процесу або використані в технологічному процесі. Залежно від розміщення у промисловому об'єкті технологічні трубопроводи розділяють на внутрішньо цехові, з'єднуючі агрегати і машини цеху і міжцехові, що з'єднують технологічні установки різних цехів.

Залежно від умов тиску трубопроводи поділяються на вакуумні, що працюють при абсолютному тиску менше 0,1 МПа, низького тиску – від 0,1 до 1,5 МПа, середнього тиску – від 1,5 до 10 МПа. Технологічні трубопроводи вважаються холодними, якщо вони працюють у середовищі, яке має робочу температуру менше 50 °С, та гарячими, якщо температура робочого середовища більш 50 °С.

За матеріалом виготовлення всі труби від малого до великого діаметру можна розподілити на дві основні групи – це металеві та неметалеві. Також у зв'язку з великою сферою застосування і різноманітністю діаметрів труб існує багато інших класифікацій, наприклад, за формою перерізу труби (звичайна або профільна); за способом виробництва (безшовні, литі, зварні), за кількістю використаних шарів (одношарові або багатошарові), а також за призначенням (загального і спеціального призначення).

Металеві труби можна розбити на три основні групи: сталеві, чавунні та мідні. До недоліків сталевих труб можна віднести їхній малий строк служби, досить високу теплопровідність. До недоліків чавунних труб відноситься велика маса, крихкість та невелика довжина відрізків, але вони більш стійкі до корозії, мають низьку теплопровідність та собівартість. Мідні труби мають великий набір переваг, але їх собівартість дуже велика. Неметалеві труби включають велику кількість видів матеріалу – керамічні, азбестоцементні, полімерні та інші. Полімерні труби мають дуже хороші характеристики – це невелика маса, низька собівартість.

Таким чином, необхідно враховувати велику кількість експлуатаційних режимних та конструктивних факторів, які впливають на умови роботи трубопроводів.

*Мета дослідження* – для визначення напружено-деформованого стану згинів трубопроводів передбачається розробка відповідної методики розрахунку та побудова алгоритму чисельного моделювання трубопроводів зі згинами.

*Методи, об'єкт та предмет дослідження.* Метод дослідження – чисельний аналіз, використовується академічне (некомерційне) програмне забезпечення Abaqus. Робота даної програми побудована на вирішенні завдань міцності методом скінченних елементів.

Об'єкт дослідження – процеси напружено-деформованого стану згинів трубопроводів.

Предмет дослідження – прямокутні (колінні) згини трубопроводів різного радіусу кривизни.

**Виклад основного матеріалу.** Рішення прикладних задач чисельними методами будується шляхом зведення заданої континуальної задачі до скінченновимірної. Для цього нескінченномірний простір допустимих функцій замінюють скінченновимірним  $V_h \subset V$ . Для побудови скінченновимірного простору  $V_h$  приміняється спосіб, в якому як базисну функцію використовують функції з кінцевим малим носієм, такі, кожна з яких тільки в порівняно невеликій (порядку шагу сітки  $h$ ) околиці відмінна від нуля, а зовні її тотожно дорівнює нулю [11]. Для їх побудови за допомогою сітки здійснюється дискретизація області  $\Omega$ , яку займає тіло, на скінченне число підобластей  $\Omega_n$ . На об'єднанні підобластей  $\Omega_n$ , що примикають до кожного вузла сітки, будується базисна функція з кінцевим малим носієм і являє собою многочлен на кожній підобласті  $\Omega_n$ . Всі лінійно незалежні функції такого виду приймаються за базисні.

У побудові скінченновимірних просторів  $V_h$  використовуються кусковополіноміальні функції, при цьому множина  $\Omega$  представляється у вигляді неперетинаючого об'єднання багатокутників  $\Omega_n$ . Коефіцієнти полінома в кожному багатокутнику вибирають таким чином, щоб забезпечити потрібну гладкість, а також однозначне визначення полінома, з умов, забезпечуючих належність приблизного рішення простору  $V$ . Нехай  $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^N$  – система базисних функцій,  $i$ -тий член якої приймає в  $i$ -том вузлі значення, що дорівнює одиниці, а в інших вузлах сітки обертається в нуль.

Тоді функція  $v_h$  може бути представлена у вигляді:

$$v_h = \sum_{i=1}^N v_i \varphi_i(x) \quad (1)$$

Лінійна комбінація (1) доповнює функцію  $v_h \subset V_h$  на всю область  $\Omega$  за її вузловими значен-

нями. Від вибору сітки та системи базисних функцій залежать вид та властивості утвореної варіаційно-сіточної схеми для розглядаємої задачі.

У побудові варіаційно-сіточних схем функціонал потенціальної енергії системи на скінченновимірному просторі допустимих функцій  $V_h$  має вигляд:

$$F(\vec{v}) = \frac{1}{2}(K\vec{v}, \vec{v}) - (\vec{f}, \vec{v}), \quad (2)$$

де  $K$  – матриця жорсткості,  $\vec{f}$  – вектор вузлових навантажень, і варіаційна задача замінюється наближеною. Найбільш часто використовується підхід, який заснован на використанні необхідної умови мінімуму функціонала (2). Тоді виникає задача розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь високого порядку:

$$K\vec{v} = \vec{f} \quad (3)$$

Тобто ми приходимо до звичайного застосування метода скінченних елементів [6]. У даній роботі пропонується розрахунок трубопроводів з урахуванням згинів, заснований на використанні метода скінчених елементів.

Розглянемо згин трубопроводу, який навантажено внутрішнім тиском (рис. 1). Основними параметрами згину є радіус  $R$ , діаметр труби  $D$ , товщина стінки  $h$ . Під час розрахунку використовувалась модель сталеві труби з модулем Юнга  $E = 2 \times 10^{11}$  Па, коефіцієнтом Пуассона  $\mu = 0,3$ , густиною  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Діаметр труби дорівнює 220 мм, товщина стінки 7 мм. Згин навантажено внутрішнім тиском  $1,2 \times 10^6$  Па.

Як видно з рис. 2, розподіл полів напружень має суттєво неоднорідний характер. Концентрація напружень відбувається на внутрішній частині поверхні труби в місці її найбільшої кривизни.

Для опису напружено-деформованого стану системи у класичній літературі використовують коефіцієнт концентрації напружень  $K$ , який у більшості випадків визначається експериментально:

$$K = \sigma_{max} / \sigma \quad (4)$$

де  $\sigma_{max}$  – максимальні локальні напруження, а  $\sigma$  – номінальні напруження в ділянці трубопроводу, віддаленого від місця концентрації.

Використання представленого чисельного експерименту для визначення коефіцієнта концентрації напружень полегшує задачу. На рис. 3 зображено залежність коефіцієнта концентрації напружень від відношення радіуса згину до зовнішнього діаметра труби. Як видно з графіка, ця залежність має нелінійний характер зі значним скачком концентрації напружень при значеннях  $R$ , які менші діаметра труби.

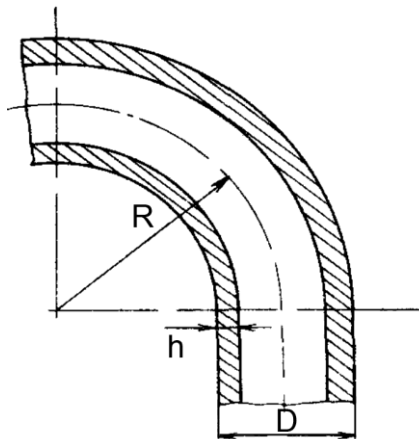


Рис. 1. Схема згину труби

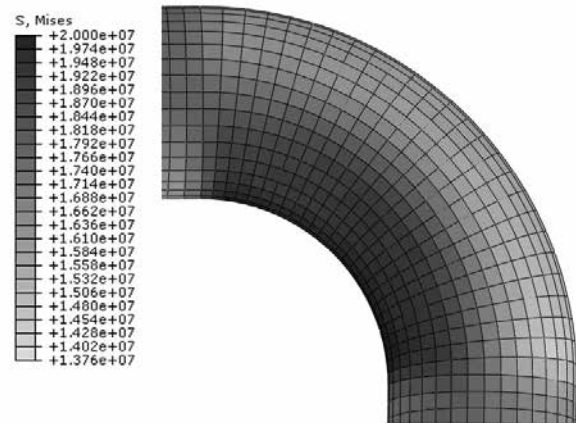


Рис. 2. Розподіл напружень в згині

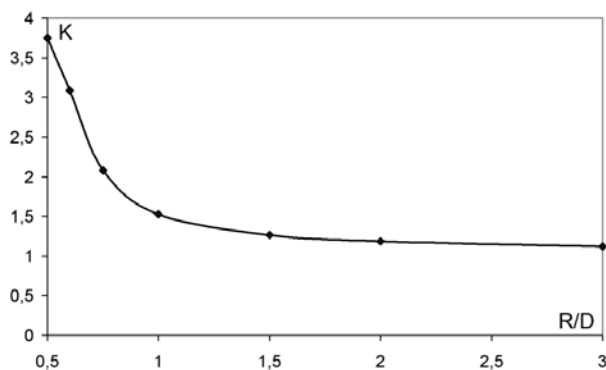


Рис. 3. Залежність коефіцієнта концентрації напружень від відношення радіуса згину до зовнішнього діаметра труби

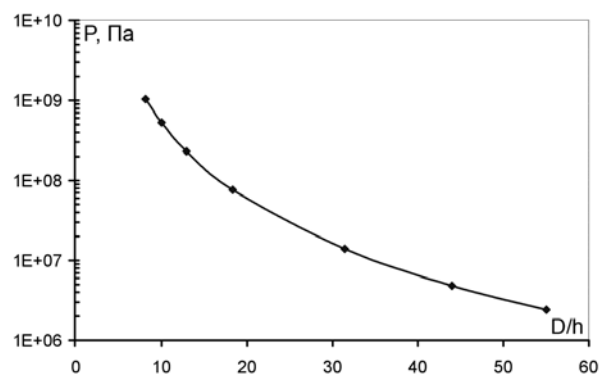


Рис. 4. Залежність критичного зовнішнього тиску від товщини стінки

Конструктивні елементи під дією зовнішнього навантаження повинні знаходитись у стані рівноваги. Це означає, що система, яка втратила рівновагу під впливом зовнішніх факторів, повинна вертатись у стан рівноваги під час зникнення дії цих факторів.

Вихід системи із початкового стану рівноваги називається втратою стійкості, а навантаження, яке відповідає цій втраті, називається критичним навантаженням. Оскільки конструкція спочатку втрачає стійкість, а потім втрачає міцність, то визначення абсолютного значення критичного навантаження є важливою проблемою під час проектування трубопроводів.

Усі елементи гідротехнічних споруд та трубопроводів, які навантажені зовнішнім тиском або в яких внутрішній тиск значно менше зовнішнього, потребують перевірного розрахунку на втрату стійкості.

У результаті чисельного експерименту для прямолинійної сталеві труби умовно нескінченної довжини була отримана залежність критичного зовнішнього тиску (під дією якого конструкція втрачає стійкість) від товщини стінки, яка представлена на рис. 4.

Використання даних представлених на рис. 4 дає можливість інженеру-конструктору під час виконання проектних робіт вибрати відповідний сортамент труб і оцінити умови міцності під час їх роботи.

**Висновки.** На основі використання методу скінчених елементів та програмного комплексу Abaqus запропоновано підхід розрахунку на міцність трубопроводів. Цей підхід дозволяє зробити аналіз напружено-деформованого стану трубопроводів з урахуванням гнбів та реальних умов експлуатації, що є необхідним на етапі проектування для забезпечення міцності та надійності конструкцій. Показано, що коефіцієнт концентрації напружень для згину труби має нелінійний характер зі значним скачком при значеннях  $R$ , які менші діаметра труби і супроводжуються втратою стійкості (руйнуванням) системи навіть при незначних навантаженнях, критичні значення яких значно зменшуються при відношенні  $R / D < 1$ . Отримана залежність критичного зовнішнього тиску від товщини стінки, яка дає можливість інженеру-конструктору під час виконання проектних робіт вибрати відповідний сортамент труб і оцінити умови міцності під час їх роботи.



## Список літератури:

1. Li H.Z., Fagerson R., Stelson K.A., A Method of Adaptive Control of Rotary-Draw Thin Walled Tube Bending With Spring Back Compensation. *Transactions of the North American Manufacturing Research*. Vol. 22, 1994. P. 25–28.
2. Pan K., Stelson K.A. On the Plastic Deformation of a Tube During Bending. *Journal of Engineering for Industry*. Vol. 117, 1995. P. 494–500.
3. Kim R.-H., Choi G.-D., Kim C.-H., Cho D.-W., Na S.-J. Arc characteristics in pulse-GMA welding with acute groove angles. *Welding journal*. Vol. 91, 2012. P. 101–105.
4. Anxin H.; Su X.; Huafeng S. Current situation of automatic welding of domestic long distance pipelines. *Natural Gas Oil*. Vol. 24 (2), 2006. P. 12–14.
5. Kotrechko S.A., Meshkov Yu.Ya., Mettus G.S., Nikonenko D.I. A new approach to the evaluation of danger of short fatigue cracks. *Strength of Materials*. Vol. 32 (3), 2000. P. 286–291.
6. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. Москва, 1975. 542 с.
7. FKM–Guideline. Analytical Strength Assessment of Components in Mechanical Engineering / Frankfurt/Main, 2003. 268 p.
8. Норри Д., Фрид Ж. Введение в метод конечных элементов. Москва, 1981. 304 с.
9. Григолюк Э.И., Фильштинский Л.А. Перфорированные пластины и оболочки. Москва, 1970. 556 с.
10. Чемерис О.М., Колодежний В.А., Трубачев С.І. Будівельна механіка машин. Київ, 2017. 258 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/18961>.
11. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. Москва : Наука, 1981. 416 с.

**Trubachev S.I., Vorobiov M.V. DETERMINATION OF CONDITIONS OF STRENGTH OF PIPELINES OF ENERGY AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT BY METHODS OF COMPUTER MODELING**

*In the paper an approach to the calculation of the strength of pipelines based on the use of the finite element method and the academic (free) version of the Abaqus software package have been developed. The aim of the work is to determine the stress-strain state of pipe bends, to build an algorithm for numerical modeling of pipeline bends and to determine their strength conditions. The object of research is the processes of stress-strain state of pipe bends. The subject of research – rectangular (knee) bends of pipelines of different radius of curvature. The formulation of the work is caused by the urgency of the task of calculating pipelines and the fact that in the literature there are almost no methods of calculating pipelines taking into account the bends based on three-dimensional models or in the exact formulation of the problem. During the calculation, a model of a steel pipe with a Young's modulus was used  $E = 2 \times 10^{11}$  Pa, Poisson's ratio  $\mu = 0.3$ , density  $\rho = 7800$  kg / m<sup>3</sup>. The diameter of the pipe was 220 mm, the wall thickness was 7 mm. The bend is loaded with an internal pressure of  $1.2 \times 10^6$  Pa. Finite-elementary calculated grids for pipe bending at different radii of curvature in the range of  $0.5 \leq R / D \leq 3$  are constructed. loss of stability (destruction) of the system even at low loads, the critical values of which are significantly reduced at ratio of  $R / D < 1$ . The obtained dependence of the critical external pressure on the wall thickness in the range  $8 \leq D / h \leq 55$  allows the design engineer during design works to select the appropriate range of pipes and assess the strength conditions during their operation. The results obtained in this work can be used for calculations of energy pipelines and for main, municipal utility and process pipelines in a wide range of variations of operating pressures and operating temperatures.*

**Key words:** critical pressure, pipe bends, pipe strength, numerical simulation, stress concentration factor, stress-strain state.

## **АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА**

---

УДК 629.7.01

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/06>

**Бойко С.М.**

Криворізький національний університет

**Олійник Ю.Л.**

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

**Журід В.І.**

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

**Ємець В.В.**

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

**Москалик В.М.**

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

**Гусарова О.В.**

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

### **АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У СУЧАСНИХ ТРЕНАЖЕРНИХ СИСТЕМАХ «ЕКІПАЖ-ВЕРТОЛІТ-СЕРЕДОВИЩЕ»**

*Авіаційний транспорт позитивно впливає на розвиток туристичного бізнесу та міжнародної торгівлі. Сьогодні більше 52% міжнародних туристичних подорожей здійснюються саме повітряним транспортом. Розвинена авіаційна галузь сприяє підвищенню інвестиційної привабливості країни і розширенню можливостей для діяльності на її території міжнародних компаній. Авіаційний транспорт також забезпечує надзвичайно швидку доставку цінних та швидкопсувних товарів до місця призначення, чим зумовлюється його широке використання великими провідними міжнародними логістичними компаніями. В рамках Авіаційної стратегії мають бути вирішені, серед інших, завдання за такими основними напрямками: підвищення рівня безпеки авіаційного транспорту, розвиток аеронавігаційної системи, професійна підготовка кадрів, науково-дослідна робота. Причина виникнення особливої ситуації зазвичай пов'язана з порушенням або невиконанням вимог нормативних документів, що регламентують льотну роботу. Однак безпосередня причина події в більшості авіаційних пригод зумовлена помилковими діями екіпажу в процесі розвитку особливої ситуації. З цього можна зробити висновок, що видаються рекомендації, спрямовані в основному на підвищення рівня професійної підготовки льотного складу, не досягають мети, оскільки орієнтуються на недосконалі методи підготовки пілотів вертольотів і слабку тренажерну базу. Тому є необхідним та актуальним питання покращення тренажерної бази для підготовки та підвищення кваліфікації пілотів вертольотів. Між тим, режими роботи авіаційних тренажерів, а особливо тренажерних систем «екіпаж-вертоліт-середовище», мають дуже складну і розгалужену структуру, а технологічні процеси дуже складні і залежать від багатьох факторів. Запропоновано використання штучних нейронних мереж у сучасних тренажерних системах «екіпаж-вертоліт-середовище».*

**Ключові слова:** нейронні мережі, тренажерні системи, підготовка пілотів, безпека польотів, людський фактор.

**Постановка проблеми.** Значення авіаційного транспорту в світовій економіці постійно зростає, чому сприяє як технологічний розвиток і новітні розробки в авіаційній галузі, так і глобалізація і все тісніші ділові та культурні зв'язки між різними країнами світу [1].

Авіаційний транспорт позитивно впливає на розвиток туристичного бізнесу та міжнародної торгівлі. Сьогодні більше 52% міжнародних туристичних подорожей здійснюються саме повітряним транспортом. Розвинена авіаційна галузь сприяє підвищенню інвестиційної привабливості країни і розширенню можливостей для діяльності на її території міжнародних компаній. Авіаційний транспорт також забезпечує надзвичайно швидко доставку цінних та швидкопсувних товарів до місця призначення, чим зумовлюється його широке використання великими провідними міжнародними логістичними компаніями.

Регулярні польоти між Україною та країнами світу здійснюють 10 вітчизняних авіакомпаній до 42 країн світу та 28 іноземних авіакомпаній до 27 країн світу. Регулярні внутрішні пасажирські перевезення між 9 містами України виконують 5 вітчизняних авіакомпаній [1].

Перевезення вантажів та пошти виконують 18 вітчизняних авіакомпаній, більша частина перевезень – це перевезення чартерними рейсами в інших державах в рамках гуманітарних та миротворчих програм ООН, а також згідно з контрактами та угодами з іншими замовниками.

Державне підприємство обслуговування повітряного руху обслуговує більше 200 тис. польотів. При цьому кількість польотів, виконаних літаками та вертольотами авіакомпаній України, збільшується, а іноземними авіакомпаніями – скорочується [1].

Реалізація Авіаційної стратегії сприяє наближенню України до ЄС, поступовій інтеграції України у внутрішній європейський ринок ЄС та спільному авіаційному простору [1].

У рамках Авіаційної стратегії мають бути вирішені, серед інших, завдання за такими основними напрямками: підвищення рівня безпеки авіаційного транспорту, розвиток аеронавігаційної системи, професійна підготовка кадрів, науково-дослідна робота.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Створення нових систем «людина-вертоліт-середовище», як показано в цілому ряді вітчизняних і зарубіжних досліджень, пов'язане з винахідницькою діяльністю і ергономічними технологіями

для досягнення поставленої мети в конкретних умовах середовища [1–7].

Дослідження показали, що використання подвійних, а тим більше потрійних джерел різнокодової інформації призводить до роздвоєння предмета трудової діяльності, ускладнення процесу переробки інформації та прийняття рішення людиною-оператором [7–9].

Як свідчать численні дослідження, причиною багатьох труднощів в складних системах, в тому числі і авіаційних, є неузгодженість технічних характеристик засобів праці з характеристиками людини [1–11].

**Постановка завдання.** Метою дослідження є обґрунтування необхідності впровадження штучних нейронних мереж під час побудови та модернізації сучасних тренажерних систем «екіпаж-вертоліт-середовище».

**Виклад основного матеріалу.** За даними Міжнародної групи з безпеки польотів вертольотів (IHST), простежується тенденція підвищення рівнів безпеки польотів гелікоптерів: зменшується як кількість авіаційних подій, так і число пригод з людськими жертвами [2].

Дослідження показують, що авіаційні події з вертольотами відрізняються високою ймовірністю загибелі людей – 47%.

Більшість авіаційних подій з вертольотами за останні 5 років відбувалося під час виконання транспортно-зв'язкових польотів – найбільш поширеного виду польотів гелікоптерів [3].

Серед факторів, що впливають на катастрофи, виділяють помилки наземного персоналу – 18,3%, і помилки екіпажу – 65%, при цьому переважна кількість авіаційних подій (65%), пов'язаних з помилками екіпажу, зумовлена трьома логічно пов'язаними групами причин: неправильні оцінки під час пілотування і навігації – 7%; неправильні рішення – 41%; неправильні дії під час пілотування і навігації – 29% [4].

Аналіз показав, що основними причинами авіаційних подій, пов'язаних з помилками екіпажу, є недостатній рівень підготовки екіпажу, допущення зайвої самовпевненості, що в результаті стає причиною розвитку факторів неправильної оцінки під час пілотування і навігації.

Причина виникнення особливої ситуації зазвичай пов'язана з порушенням або невиконанням вимог нормативних документів, що регламентують льотну роботу. Однак безпосередня причина події в більшості авіаційних пригод зумовлена помилковими діями екіпажу в процесі розвитку особливої ситуації [5].

З цього можна зробити висновок, що видаються рекомендації, спрямовані в основному на підвищення рівня професійної підготовки льотного складу, не досягають мети, оскільки орієнтуються на недосконалі методи підготовки пілотів вертольотів і слабку тренажерну базу.

Тому є необхідним та актуальним питання покращення тренажерної бази для підготовки та підвищення кваліфікації пілотів вертольотів.

Між тим, режими роботи авіаційних тренажерів, а особливо тренажерних систем «екіпаж-вертоліт-середовище», мають дуже складну і розгалужену структуру, а технологічні процеси дуже складні і залежать від багатьох факторів. Зокрема, прогнозування є важкою і складною задачею, оскільки похибка прогнозу не може перевищувати 4%. Тому в умовах тренажерних систем доцільно використання для одержання прогнозу та імітування різних режимів роботи штучних нейронних мереж (ШНМ), які передбачають наявність суттєвих зв'язків між окремими факторами.

Найпростіша ШНМ складається з певної кількості ШНМ, які об'єднують у групи, які утворюють шари, нейрони яких ваговими зв'язками з'єднуються із вхідними сигналами від інших нейронів, попередніх шарів.

В результаті перетворень вхідних сигналів у нейронах певних слоїв на виході із ШНМ одержують сигнал OUT [8].

Вагові коефіцієнти можна записати у вигляді матриці, яка має  $m$  рядків та  $n$  стовпчиків:

$$W = \begin{pmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \dots & \omega_{1n} \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \dots & \omega_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_{m1} & \omega_{m2} & \dots & \omega_{mn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $m$  – кількість входів,  $n$  – кількість нейронів ШНМ.

Тоді вихідний вектор  $\vec{B}$ , елементами якого є виходи сигналів OUT із вихідних нейронів, обчислюють як матричний добуток матриці-рядка  $\vec{X}$ -вихідних елементів на матрицю  $\vec{W}$  вагових коефіцієнтів:

$$\vec{B} = \vec{X}\vec{W}, \quad (2)$$

де  $\vec{B}$  – вектор-рядок.

Якщо потрібний вихід із  $i$ -го нейрона позначити  $y_i$ , а реальний вихід із  $i$ -го нейрона позначити  $\hat{y}_i$ , тоді похибку для  $k$ -го зразка можна обчислити за формулою:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Тоді загальна похибка для всієї виборки:

$$\Delta E_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n E_k, \quad k = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Комбінований (сумарний) вхід до даного нейрона визначає його збудженість (активність), тобто сумарне значення вагових зв'язків, які впливають на цей нейрон, визначає реальний стан нейрона [9].

Для одного зразка, за лінійної функції активації сигналу у нейроні, похибку можна визначити за формулою:

$$E = \frac{1}{2} (y_i - \hat{y})^2 = \frac{1}{2} (y_i - NET)^2. \quad (5)$$

Перетворивши цей вираз, одержимо:

$$E = 0,5(y_i^2 - 2y_i\hat{y} + \hat{y}^2) = 0,5[y_i^2 - 2y_i(NET) + (NET)^2].$$

Оскільки  $\hat{y} = (NET) = (x_1\omega_1 + x_2\omega_2)$  для двох вагових зв'язків, тоді

$$\begin{aligned} E &= 0,5[y_i^2 - 2y_i(x_1\omega_1 + x_2\omega_2) + (x_1\omega_1 + x_2\omega_2)^2] = \\ &= 0,5[y_i^2 - 2y_ix_1\omega_1 - 2y_ix_2\omega_2 + (x_1\omega_1)^2 + 2x_1\omega_1x_2\omega_2 + (x_2\omega_2)^2] = \\ &= 0,5[y_i^2 - 2y_ix_1\omega_1 - 2y_ix_2\omega_2 + x_1^2\omega_1^2 + 2x_1\omega_1x_2\omega_2 + x_2^2\omega_2^2]. \end{aligned}$$

Знайдемо залежність похибки  $E$  від  $\omega_1$ .

$$\begin{aligned} E(\omega_1) &= 0,5[x_1^2\omega_1^2 + (2x_1x_2\omega_2 - 2y_ix_1)\omega_1 + (y_i - 2y_ix_2\omega_2 + \omega_2^2x_2^2)] = \\ &= 0,5x_1^2\omega_1^2 + (x_1x_2\omega_2 - y_ix_1)\omega_1 + (0,5y_i - y_ix_2\omega_2 + 0,5\omega_2^2x_2^2). \end{aligned}$$

Позначивши  $0,5x_1^2 = a$ ,  $x_1x_2\omega_2 - y_ix_1 = b$ ,  $0,5y_i - y_ix_2\omega_2 + 0,5\omega_2^2x_2^2 = c$ , отримуємо:

$$E(\omega_1) = a\omega_1^2 + b\omega_1 + c. \quad (6)$$

Тобто залежність похибки  $E$  від  $\omega_1$  є параболічною, аналогічно залежність похибки  $E$  від  $\omega_2$  також буде параболічною. Оскільки  $a = 0,5x_1^2 > 0$ , то вітки параболи направлені вгору (в додатному напрямку вісі  $E$ ). А це означає, що графік залежності  $E(\omega_1)$  має локальний мінімум, який співпадає із вершиною параболи, яка є графіком залежності  $E(\omega_1)$  [10].

Оскільки вагові коефіцієнти на початковому етапі навчання ШНМ набирають деяких випадкових значень, точка, що характеризує початкове положення ШНМ у площині  $E, \omega_1$  може бути у довільному місці і мало ймовірно, що буде знаходитись в точці локального мінімуму.

Для корегування вагових коефіцієнтів можна застосувати правило Відроу-Хоффа або дельта-правило, яке в загальному вигляді має такий математичний запис:

$$\Delta \omega_{ij} = \eta \delta_j x_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (7)$$

де  $\delta_j = y_j - \hat{y}_j$  – потрібний вихід із нейтрона  $j$ , а  $y_j$  – фактичний (реальний) вихід із  $j$ -нейтрона,

$x_i$  – сигнал, який прийшов від  $i$ -нейтрона,  $\eta$  – коефіцієнт зміни вагових коефіцієнтів (норма навчання),  $\Delta\omega_{ij}$  – величина зміни вагового коефіцієнта зв'язку між  $i$  та  $j$  нейтроном.

В загальному вигляді дельта правило можна записати у вигляді:

$$\Delta\omega_{ij} = \eta\delta_j x_i = \eta(y_j - \hat{y}_j)x_i = \eta(y_j - \sum_{j=1}^m x_i\omega_{ij})x_i, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (8)$$

Швидкість зміни похибки  $\frac{\partial E}{\partial \hat{y}_j}$  відносно зміни реального виходу із  $j$ -нейтрона чисельно рівна:

$$\frac{\partial E}{\partial \hat{y}_j} = \hat{y}_j - y_j = -\delta_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (9)$$

а швидкість зміни виходу  $\hat{y}_j$  із  $j$ -нейтрона від зміни вагових коефіцієнтів  $\Delta\omega_{ij}$  можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \hat{y}_j}{\partial \omega_{ij}} = x_i, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (10)$$

Тоді швидкість зміни похибки від зміни вагових коефіцієнтів можна записати:

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial \hat{y}_j} \frac{\partial \hat{y}_j}{\partial \omega_{ij}}, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (11)$$

$$-\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = -\delta_j x_i, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} = \delta_j x_i, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (13)$$

де  $\frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}}$  – похідна по поверхні похибок залежно від зміни вагових коефіцієнтів.

Розглянемо реакцію скритих нейронів на вхід і вихід із вихідного шару ШНМ на вхідні дані для НМ із двома вхідними, двома скритими і одним нейроном вихідного шару за використання порогової функції із числовим значенням порогу  $T=0,4$  при зміщеннях  $\Theta_{1(1)}=1,2$  для одного нейрона,  $\Theta_{2(1)}=0,8$  – для другого нейрона прихованого шару,  $\Theta_{1(2)}=-0,2$  – для вихідного шару; із матри-

цями вихідних коефіцієнтів  $W_1 = \begin{pmatrix} 1,2 & 0,8 \\ -0,5 & -0,5 \end{pmatrix}$  – для прихованого шару,  $W_2 = \begin{pmatrix} -0,2 \\ 0,7 \\ -0,3 \end{pmatrix}$  – для вихідного шару, якщо на нейрони входу будуть подавати сигнали  $x_1$  та  $x_2$ , напрямки яких утворюють наступний кортеж:

$$\{(1;1), (1;0), (0;1), (0;0)\}$$

Вхідні значення зразків перетворюються під дією вагових коефіцієнтів матриці  $W_1$  та зміщень  $\Theta_1$  та  $\Theta_2$  у сумірюючому блоці нейронів прихованого шару, а після активації пороговою функцією у блоці активації (БА) нейронів прихованого шару одержуємо числові значення виходів із нейронів прихованого шару  $NET_1$  та  $NET_2$ . Потім у нейроні вихідного шару під дією вагових коефіцієнтів матриці  $W_2$  та зміщення  $\Theta_3$  та активації пороговою функцією у БА вихідного нейрона одержуємо вихідне числове значення OUT для кожного зразка вхідних сигналів  $x_1, x_2$ .

Під час застосування алгоритму зворотного поширення в процесі навчання ШНМ мінімізує похибку на навчальній множині, а не ту похибку, яку одержали від ШНМ під час обробки абсолютно нових спостережень. ШНМ із великою кількістю вагових коефіцієнтів можуть розв'язувати більш складні задачі, водночас вони більш схильні до перенавчання, а із такою кількістю вагових коефіцієнтів ШНМ недостатньо гнучкі, щоб розв'язувати певні типи задач. ШНМ без проміжних слоїв можуть розв'язувати (моделювати) лише задачі із звичайного лінійною залежністю. Водночас ШНМ із більш складною структурою дають на виході похибку, але це може бути переважанням мережі, запобігти якого можливо у разі застосування механізму контрольної перевірки (крос-перевірки) резервування частини навчаючих спостережень з метою невикористання їх у процесі навчання. Важливим показником якості роботи ШНМ є контрольна похибка. За майже однакових значень контрольних похибок необхідно вибирати ШНМ із більш простою моделлю. У разі багаторазових експериментів над ШНМ контрольна помилка є визначальною під час вибору моделі майбутньої ШНМ. З метою підтвердження правильного вибору моделі її тестують на тестовій множині спостережень, яке використовується лише один раз. Тобто всі стани навчання на алгоритму зворотного поширення передбачають використання таких множин: 1) навчальна; 2) контрольна; 3) тестова, які повинні бути репрезентативними із точки зору змісту задачі, а також окремо взяті ці множини повинні бути репрезентативними. Якщо навчальна множина не репрезентативна, то модель ШНМ буде неякісною, або й зовсім (непотрібною) не придатною для розв'язання задач [11].

Основні причини, які погіршують якість навчальної множини: 1) вибір історичних даних закономірність, в яких не мають місця у май-

бутньому розвитку процесу, тобто майбутнє не завжди схоже на минуле; 2) недостатній рівень врахування властивостей даних ШНМ (враховані не всі можливості нейромережі); 3) недостатньо глибоко проаналізовані вибрані всі можливі властивості об'єкта аналізу ШНМ (нейромережа навчається всьому тому, де простіше і швидше навчатись); 4) незбалансованість набору даних

навчальної множини, тобто нерівномірність підбору даних спостережень різних типів.

**Висновки.** У статті обґрунтовано необхідність покращення тренажерної бази для підготовки та підвищення кваліфікації пілотів вертольотів.

Запропоновано використання штучних нейронних мереж у сучасних тренажерних системах «екіпаж-вертоліт-середовище».

#### Список літератури:

1. Бабак В.П., Харченко В.П., Максимов В.О. та ін. Безпека авіації Київ, 2004. 584 с.
2. Офіційний сайт Міжнародної групи з безпеки польотів вертольотів (IHST). URL: <http://ihstf.aero/> (дата звернення: 02.04.2021).
3. Дергачев К.В., Кузьменко А.А., Спасенников В.В. Анализ взаимосвязи объекта и парадигмы исследования в эргономике с использованием информационных технологий. Москва, 2019. № 1 (03). С. 12–22.
4. Чунтул А.В. Человек в вертолете: психофизиология профессиональной деятельности экипажей современных и перспективных вертолетов. Москва, 2018. 320 с.
5. Эргономические технологии разработки и испытаний вертолетов «МИ» / Под ред. А.Г. Самусенко, Г.П. Ступакова, А.В. Чунтула. Москва, 2012. 288 с.
6. Meister D. The history of human factors and ergonomics NJ, 1999. 588 p.
7. Chuntul A.V., Lapa V.V., Davidov V.V. Spatial orientation of pilot using a cockpit exterior surveillance system. *Human psychology*. 2015. vol. 41, № 7, P. 728–731.
8. Jesse Russell Искусственная нейронная сеть. Москва, 2012. 200 с.
9. Jesse Russell Нейрон. М., 2012. 200 с.
10. Бунаков В.Е., Краснов Л.В. Нейронная физика. Учебное пособие: моногр. Москва, 2015. 200 с.
11. Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. М., 2009. 432 с.

#### **Boiko S.M., Oliinyk Yu.L., Zhurid V.I., Yemets V.V., Moskalyk V.M., Husarova O.V. ASPECTS OF USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN MODERN TRAINING SYSTEMS “CREW-HELICOPTER-ENVIRONMENT”**

*Air transport has a positive impact on the development of tourism business and international trade. Today, more than 52% of international tourist travel is carried out by air. The developed aviation industry contributes to increasing the investment attractiveness of the country and expanding opportunities for international companies to operate in its territory. Air transport also provides extremely fast delivery of valuable and perishable goods to the destination, which is why it is widely used by large leading international logistics companies. Within the framework of the Aviation Strategy, tasks should be solved, among others, in the following main areas: improving the level of air transport safety, development of the air navigation system, professional training, research. The reason for the occurrence of a special situation, as a rule, is related to the violation or non-compliance with the requirements of regulations governing flight operations. However, the immediate cause of the accident in most aviation accidents is due to the erroneous actions of the crew in the development of a special situation. From this we can conclude that the issued recommendations, aimed mainly at improving the level of professional training of flight crew, do not achieve their goal, as they focus on imperfect methods of training helicopter pilots and a weak training base. Therefore, it is necessary and urgent to improve the training base for training and retraining of helicopter pilots. Meanwhile, the modes of operation of aircraft simulators, and especially training systems "crew-helicopter-environment", has a very complex and branched structure, and technological processes are very complex and depend on many factors, forecasting, which is a difficult and difficult task. The use of artificial neural networks in modern training systems "crew-helicopter-environment" is proposed.*

**Key words:** neural networks, training systems, pilot training, flight safety, human factor.

**Зайцев Є.П.**

Льотна академія Національного авіаційного університету

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВІЧІ НЕЛІНІЙНОЇ ЗАДАЧІ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ІЗОТРОПНОГО ТЕРМОЧУТЛИВОГО ЦИЛІНДРА ПІД ВПЛИВОМ ЗОНАЛЬНОГО ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛООБМІНУ

У статті розглядається застосування розробленого наближеного аналітичного методу до вирішення крайової задачі нестационарної теплопровідності для скінченного суцільного трансверсально-ізотропного термочутливого циліндра, схильного до впливу зонального конвективно-променевого теплообміну. Процес перенесення енергії (теплоти) є одним із найважливіших напрямів сучасної науки і має велике практичне значення в розрахунках і проєктуванні ядерних реакторів, авіаційної техніки, теплообмінних апаратів різних конструкцій. Авіаційна техніка базується на використанні новітніх науково-технічних досягнень у всіх сучасних галузях знань, будучи каталізатором науково-технічного прогресу як в області фундаментальних наук (аеродинаміка і газодинаміка, механіка, фізика твердого тіла і т. д.), так і в області прикладних досліджень (матеріалознавство, приладобудування, електроніка і т. д.) Тому на сучасному етапі розвитку авіаційної техніки необхідно максимально забезпечити міцність, надійність і довговічність елементів конструкцій літального апарата, який працює в умовах високотемпературного теплообміну. На шляху вирішення цієї проблеми, переходу на більш високі режимні параметри роботи теплоенергетичного обладнання істотного значення набувають питання більш точного визначення температурних полів твердого тіла і виділення переважаючих факторів теплообміну. Отримане замкнене рішення у вигляді функціональної залежності дає змогу неперервно описувати в просторі і часі розподіл температурних полів у цьому тілі, найбільш повно й адекватно виявити вплив усіх діючих факторів на розподіл температури, знайти залежності між найважливішими параметрами, провести детальний аналіз кінетики і динаміки процесу і надалі використовувати його для розрахунку термонапруженого стану тіла. На великій кількості числових розрахунків, виконаних у середовищі Matlab, для двох випадків зонального теплового впливу в широкому діапазоні критерію Фур'є встановлені якісні впливи теплової анізотропії, термочутливості матеріалу і подвійної нелінійності на розподіл відносної температури вздовж осі в центрі і поверхні циліндра. Крім того, цей метод дає змогу використовувати його як отримання тестових рішень у процесі розрахунків складних елементів конструкцій.

**Ключові слова:** теплопровідність, анізотропія, термочутливість, суперпозиція, перетворення Гудмена і Кірхгофа, ряди Фур'є.

**Постановка проблеми.** Серед розширеної номенклатури конструкційних матеріалів, що успішно функціонують в умовах високотемпературного теплообміну (терморадіаційного, аеродинамічного, конвективно-променевого), широке застосування знаходять анізотропні матеріали, які застосовуються для деталей космічних і повітряних літальних апаратів, реактивних і ракетних двигунів. Великі градієнти температури, які виникають при цьому, вимагають у відповідній математичній постановці задачі теплопровідності обліку, як залежності теплофізичних характеристик матеріалу від температури, так і високотемпературного теплообміну з навколишнім середовищем, що робить поставлену задачу двічі нелінійною.

Тому зростає роль наближених аналітичних методів розв'язання крайових задач теплопровідності у двічі нелінійній постановці [1; 2] з урахуванням анізотропії матеріалу.

Використаний у роботі для розрахунку трансверсально-ізотропний графіт володіє унікальним набором якостей, які роблять його незамінним для задач ядерної фізики та енергетики. Графіт є гарним конструкційним матеріалом завдяки тому, що він залишається твердим аж до температур порядку  $4000^{\circ}\text{C}$ . Крім того, графіт має високу теплопровідність і теплоємність [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений огляд і аналіз літератури показує, що в обліку нелінійностей у задачах теплопро-

відності переважно використовують наближені аналітичні та чисельні методи [4; 5; 6; 7]. Однак серед них незначна частина робіт вирішується у двічі нелінійній постановці. Тому ця робота частково усуває цю прогалину і може слугувати критерієм оцінки достовірності чисельних рішень. Актуальність розв'язуваної задачі полягає в тому, що розробка наближеного аналітичного методу дає змогу найбільш повно й адекватно враховувати властивості матеріалу, анізотропію і високотемпературний теплообмін із навколишнім середовищем, оскільки правильно організований теплообмін є неодмінною умовою безпечної і безаварійної роботи теплових агрегатів, у тому числі теплоенергетики й авіаційної промисловості. Метою дослідження є встановлення кількісного і якісного впливу подвійної нелінійності і анізотропії на розподіл температурних полів у циліндрі при різних значеннях критерію Фур'є.

**Постановка завдання.** Розглянемо скінчений суцільний трансверсально-ізотропний циліндр радіуса  $R$ , який має нульову початкову температуру, вісь якого поєднана з віссю циліндричної системи координат  $(r, \varphi, z)$ , а її початок розташовано в центрі симетрії циліндра. По поверхні  $(r = R)$  циліндр осесиметрично і зонально нагрівається конвективно-променевим середовищем із температурою  $T_c$  двома способами:

$$I. \psi_1(z, t) = T_c H(t) H(d - |z|); \quad H(\xi) = \begin{cases} 1, & \xi > 0, \\ 0, & \xi < 0, \end{cases}$$

$$II. \psi_2(z, t) = T_c H(t) \left\{ H(d - z) + \sum_{i=1}^N (H(g_i + d_i - z) - H(g_i - d_i - z)) \right\},$$

а на торцях має місце конвективний теплообмін за законом Ньютона, де  $H$  – функція Хевісайда,  $b$  – половина довжини центральної зони,  $d_i$  – половина довжини зони, віддаленої від початку координат на відстані  $g_i$ . Потрібно знайти розподіл температури  $T(r, z, t)$  по осі циліндра залежно від критерія Фур'є. Нестационарне температурне поле в циліндрі може бути визначено з вирішенням крайової задачі, записаної в розмірному вигляді:

$$\begin{aligned} \circ C_v(T)T_{,t} &= (\lambda_r(T)T_{,r})_{,r} + \lambda_r(T)T_{,r}/r + (\lambda_z(T)T_{,z})_{,z}, \\ (0 < r < R, |z| < l, t > 0); \\ T|_{t=0} &= 0; \quad T_{,r}|_{r=0} = 0; \\ \lambda_r(T)T_{,r}|_{r=R} &= \left\{ \alpha_1(\psi_i(z, t) - T) + \sigma_2(\psi_i^4(z, t) - T^4) \right\}|_{r=R}; \\ \left\{ \lambda_z(T)T_{,z} - \alpha_2 T \right\}|_{z=-l} &= 0; \quad \left\{ \lambda_z(T)T_{,z} + \alpha_2 T \right\}|_{z=l} = 0, \bullet (1) \end{aligned}$$

де  $\circ$  і  $\bullet$  початок і кінець групи співвідношень, диференціювання показано через кому,  $\sigma_2 = \varepsilon\sigma_0$  – наведений коефіцієнт теплообміну випромінюванням,  $\varepsilon$  – степінь чорноти,  $\sigma_0$  – постійна Стефана-Больцмана,  $\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі.

Надамо поставленій задачі (1) безрозмірний вигляд щодо  $\theta(\rho, \eta, Fo) = T(r, z, t)/T_c$ :

$$\begin{aligned} \circ C_v^*(\theta)\theta_{,Fo} &= (\lambda_r^*(\theta)\theta_{,p})_{,p} + \\ &+ \lambda_r^*(\theta)\theta_{,p}/\rho + \kappa^2(\lambda_z^*(\theta)\theta_{,n})_{,n}, \end{aligned}$$

$$(0 < \rho < 1, |\eta| < L, Fo > 0); \quad \theta|_{Fo=0} = 0; \quad \theta_{,p}|_{\rho=0} = 0;$$

$$\begin{aligned} \lambda_r^*(\theta)\theta_{,p}|_{\rho=1} &= \left\{ Bi_1(\chi_i(\eta, Fo) - \theta) + Sk(\chi_i^4(\eta, Fo) - \theta^4) \right\}|_{\rho=1}; \\ \left\{ \lambda_z^*(\theta)\theta_{,n} - Bi_2\theta \right\}|_{\eta=-L} &= 0; \quad \left\{ \lambda_z^*(\theta)\theta_{,n} + Bi_2\theta \right\}|_{\eta=L} = 0; \bullet (2) \end{aligned}$$

де теплофізичні характеристики представлені у вигляді добутку двох множників, з яких перший з індексом «нуль» розмірний і не змінюється, а другий, позначений зірочкою, безрозмірний і є функцією температури

$$\lambda_r(T) = \lambda_{r0}\lambda_r^*(\theta), \quad \lambda_z(T) = \lambda_{z0}\lambda_z^*(\theta),$$

$$C_v(T) = C_{v0}C_v^*(\theta); \quad \rho = r/R; \quad \eta = z/R; \quad L = l/R;$$

$$a = \lambda_{r0}/C_{v0}; \quad Fo = at/R^2; \quad Bi_1 = \alpha_1 R/\lambda_{r0}; \quad Bi_2 = \alpha_2 R/\lambda_{z0};$$

$$Sk = \sigma_2 R T_c^3/\lambda_{r0}; \quad \beta = d/R; \quad \kappa^2 = \lambda_{z0}/\lambda_{r0};$$

$$\beta_i = d_i/R; \quad \delta_i = g_i/R; \quad \chi_1(\eta, Fo) = H(Fo)H(\beta - |\eta|);$$

$$\chi_2(\eta, Fo) = H(Fo)\{H(\beta - |\eta|) +$$

$$+ \sum_{i=1}^N (H(\delta_i + \beta_i - |\eta|) - H(\delta_i - \beta_i - |\eta|))\}.$$

Для вирішення системи (2) скористаємося методом суперпозиції [1; 8], який дає змогу лінеаризувати наведену систему. З цією метою введемо в (2) інтегральні аналоги, які є перетвореннями Гудмена і Кірхгофа:

$$\begin{aligned} \circ A(\theta) &= \int_0^\theta C_v^*(\theta')d\theta', \quad B_r(\theta) = \int_0^\theta \lambda_r^*(\theta')d\theta' \\ B_z(\theta) &= \int_0^\theta \lambda_z^*(\theta')d\theta' \bullet (3) \end{aligned}$$

Використовуючи диференціальні співвідношення для переходу до нових функцій  $A(\theta)_{,Fo} = C_v^*(\theta)\theta_{,Fo}$ ,  $B_r(\theta)_{,p} = \lambda_r^*(\theta)\theta_{,p}$ ,  $B_z(\theta)_{,n} = \lambda_z^*(\theta)\theta_{,n}$  перетворимо (2) в еквівалентний вигляд:

$$\circ A(\theta)_{,Fo} = B_r(\theta)_{,pp} + \rho^{-1}B_r(\theta)_{,p} + \kappa^2 B_z(\theta)_{,nn};$$

$$\theta(\rho, \eta, Fo)|_{Fo=0} = 0; \quad \theta_{,p}|_{\rho=0} = 0;$$

$$\left\{ B_z(\theta)_{,n} - Bi_2\theta \right\}|_{\eta=-L} = 0; \quad \left\{ B_z(\theta)_{,n} + Bi_2\theta \right\}|_{\eta=L} = 0;$$



$$\begin{aligned} & \left( B_r(\theta)_{,\rho} + (Bi_1 \cdot \theta + Sk \cdot \theta^4) \right) \Big|_{\rho=1} = \\ & = Bi_1 \cdot \chi_i(\eta, Fo) + Sk \cdot \chi_i^4(\eta, Fo). \bullet \end{aligned} \quad (4)$$

В (4) функції (3) і  $\theta^{(m)}$  ( $m = \overline{1, 4}$ ) неперервні і задовольняють умовам Діріхле [9] на апріорно вибраному інтервалі  $(0, \theta_p)$  ( $\theta_p$  – поки невизначена постійна), а отже, їх можна представити у вигляді збіжних рядів Фур’є за синусами:

$$\begin{aligned} \circ \theta &= \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k^{(1)} \sin \frac{k\pi\theta}{\theta_p} = \sum_{k=1}^{\infty} \theta^{(k)}; \\ \theta^{(k)} &= \alpha_k^{(1)} \sin \frac{k\pi\theta}{\theta_p}; \bullet \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \circ A(\theta) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)}; B_r(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_{rk}}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)}; \\ B_z(\theta) &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_{zk}}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)}; \theta^m = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\alpha_k^{(m)}}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)}, \bullet \end{aligned} \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} \circ (a_k, b_{rk}, b_{zk}) &= \frac{2}{\theta_p} \int_0^{\theta_p} (A(\theta), B_r(\theta), B_z(\theta)) \sin \frac{k\pi\theta}{\theta_p} d\theta, \\ \alpha_k^{(m)} &= \frac{2}{\theta_p} \int_0^{\theta_p} \theta^m \sin \frac{k\pi\theta}{\theta_p} d\theta, \bullet \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \circ \alpha_k^{(1)} &= \frac{2\theta_p(-1)^{k+1}}{k\pi}; \\ \alpha_k^{(4)} &= \frac{2\theta_p^4 \{(-1)^{k+1} [(k\pi)^4 - 12(k\pi)^2 + 24] + 24\}}{(k\pi)^5}; \\ \alpha_k^{(2)} &= \frac{2\theta_p^2 \{(-1)^{k+1} (k\pi)^2 - 2[(-1)^{k+1} + 1]\}}{(k\pi)^3}; \\ \alpha_k^{(3)} &= \frac{2\theta_p^3 (-1)^{k+1} [(k\pi)^2 - 6]}{(k\pi)^3}. \bullet \end{aligned} \quad (8)$$

З урахуванням (5), (6) і розкладання експоненти  $e^x$  в ряд Маклорена при  $x=1$ , тобто  $1 = \sum_{k=1}^{\infty} e^{-1}/(k-1)!$ , (4) переписемо у вигляді:

$$\begin{aligned} \circ \left( \sum_{k=1}^{\infty} \frac{a_k}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)} \right)_{,Fo} &= \left( \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_{rk}}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)} \right)_{,\rho\rho} + \\ &+ \frac{1}{\rho} \left( \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_{rk}}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)} \right)_{,\rho} + \kappa^2 \left( \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_{zk}}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)} \right)_{,\eta\eta}; \\ \left\{ \left( \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_{rk}}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)} \right)_{,\rho} + \sum_{k=1}^{\infty} \left( Bi_1 + Sk \frac{\alpha_k^{(4)}}{\alpha_k^{(1)}} \right) \theta^{(k)} \right\} &= \\ = (Bi_1 \chi_i(\eta, Fo) + Sk \chi_i^4(\eta, Fo)) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e}{(k-1)!}; \\ \sum_{k=1}^{\infty} \theta^{(k)} \Big|_{Fo=0} &= 0; \left( \sum_{k=1}^{\infty} \theta^{(k)} \right)_{,\rho} \Big|_{\rho=0} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left\{ \left( \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_{zk}}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)} \right)_{,\eta} - Bi_2 \sum_{k=1}^{\infty} \theta^{(k)} \right\} &= 0; \\ \left\{ \left( \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b_{zk}}{\alpha_k^{(1)}} \theta^{(k)} \right)_{,\eta} + Bi_2 \sum_{k=1}^{\infty} \theta^{(k)} \right\} &= 0. \bullet \end{aligned} \quad (9)$$

Застосовуючи до (9) принцип суперпозиції [8], отримаємо сукупність задач теплопровідності:

$$\begin{aligned} \circ \theta_{,Fo_k}^{(k)} &= \theta_{,\rho\rho}^{(k)} + \rho^{-1} \theta_{,\rho}^{(k)} + \kappa_k^2 \theta_{,\eta\eta}^{(k)}; \\ \theta^{(k)}(\rho, \eta, Fo_k) \Big|_{Fo_k=0} &= 0; \theta_{,\rho}^{(k)} \Big|_{\rho=0} = 0; \\ \left\{ \theta_{,\eta}^{(k)} - Bi_{2k} \theta^{(k)} \right\} \Big|_{\eta=-L} &= 0; \left\{ \theta_{,\eta}^{(k)} + Bi_{2k} \theta^{(k)} \right\} \Big|_{\eta=L} = 0; \\ \left\{ \theta_{,\rho}^{(k)} + Bi_{1k} \theta^{(k)} \right\} \Big|_{\rho=1} &= M_k, \bullet \end{aligned} \quad (10)$$

де

$$\begin{aligned} \circ Fo_k &= \alpha_k Fo, \quad \alpha_k = b_{rk}/a_k, \quad Bi_{2k} = Bi_2 \alpha_k^{(1)}/b_{zk}, \\ Bi_{1k} &= \{ Bi_1 \alpha_k^{(1)} + Sk \alpha_k^{(4)} \} / b_{rk}, \quad \kappa_k^2 = (b_{zk}/b_{rk}) \cdot \kappa^2, \\ M_k &= (Bi_1 \chi_i(\eta, Fo) + Sk \chi_i^4(\eta, Fo)) \times \\ &\times \alpha_k^{(1)} / (e b_{rk} (k-1)!) \bullet \end{aligned} \quad (11)$$

Застосуємо до системи (10) скінчене косинус перетворення Фур’є за змінною  $\eta$  [10; 11]

$$\bar{\theta}^{(k)}(\rho, Fo_k) = \int_0^L \theta^{(k)}(\rho, \eta, Fo_k) \cdot \cos(v_{kn} \eta) d\eta,$$

де  $v_{kn}$  – корені характеристичного рівняння  $tg(v_{kn} L) = Bi_{2k}/v_{kn}$ .

У результаті отримаємо

$$\begin{aligned} \circ \bar{\theta}_{,Fo_k}^{(k)} &= \bar{\theta}_{,\rho\rho}^{(k)} + \rho^{-1} \bar{\theta}_{,\rho}^{(k)} - \kappa_k^2 v_{kn}^2 \bar{\theta}^{(k)}; \\ \bar{\theta}^{(k)}(\rho, v_{kn}, Fo_k) \Big|_{Fo_k=0} &= 0; \bar{\theta}_{,\rho}^{(k)} \Big|_{\rho=0} = 0; \\ \left\{ \bar{\theta}_{,\rho}^{(k)} + Bi_{1k} \bar{\theta}^{(k)} \right\} \Big|_{\rho=1} &= \bar{M}_k. \bullet \end{aligned} \quad (12)$$

Виконаємо скінчене косинус перетворення Фур’є над виразом  $M_k$ , з урахуванням функції Хевісайда і позначення  $D_k = (Bi_1 + Sk) \alpha_k^{(1)} / (e \cdot b_{rk} \cdot (k-1)!)$ :

$$\begin{aligned} \bar{M}_k &= \int_0^L (Bi_1 \chi_i(\eta, Fo_k) + Sk \chi_i^4(\eta, Fo_k)) \\ &\frac{\alpha_k^{(1)}}{e b_{rk} (k-1)!} \cos v_{kn} \eta d\eta = D_k H(Fo_k) \times \\ &\times \int_0^{\beta} \cos v_{kn} \eta d\eta = D_k H(Fo_k) \frac{\sin v_{kn} \beta}{v_{kn}}. \end{aligned}$$

Для  $\chi_2(\eta, Fo)$  і  $N=1$ , отримаємо

$$\bar{M}_k = \frac{D_k H(Fo_k)}{v_{kn}} (\sin v_{kn} \beta + 2 \sin v_{kn} \beta \cos v_{kn} \delta).$$

Застосовуючи до (12) скінчене перетворення Ханкеля [10; 11], де

$$\bar{\theta}^{(k)*}(Fo_k) = \int_0^1 \rho \bar{\theta}^{(k)}(\rho, Fo_k) J_0(\mu_{ki}\rho) d\rho,$$

де  $\mu_{ki}$  – додатні корені рівняння

$\mu_{ki} J_1(\mu_{ki}) - Bi_{1k} J_0(\mu_{ki}) = 0$ , отримаємо таке зображення:

$$\begin{aligned} \circ \bar{\theta}_{,Fo_k}^{(k)*} + w_{ni}^{(k)} \bar{\theta}^{(k)*} &= J_0(\mu_{ki}) \bar{M}_k, \\ \bar{\theta}^{(k)*}(Fo_k) &= 0, \bullet \end{aligned} \quad (13)$$

де  $w_{ni}^{(k)} = \mu_{ki}^2 + \kappa_k^2 v_{kn}^2$ .

Рішення системи (13) щодо зображення має вигляд:

$$\bar{\theta}^{(k)*}(Fo_k) = D_k \cdot \bar{M}'_k \cdot \frac{1 - e^{-w_{ni}^{(k)} Fo_k}}{w_{ni}^{(k)}};$$

$$I. \bar{M}'_k = \frac{\sin(v_{kn}\beta)}{v_{kn}};$$

$$II. \bar{M}'_k = \frac{1}{v_{kn}} (\sin v_{kn}\beta + 2 \sin v_{kn}\beta \cos v_{kn}\delta).$$

Застосовуючи до (13) обернене перетворення Ханкеля  $\bar{\theta}^{(k)}(\rho, Fo_k) = \sum_{i=1}^{\infty} B_{ki} J_0(\mu_{ki}\rho) \bar{\theta}^{(k)*}(Fo_k)$ , де

$B_{ki} = \frac{2\mu_{ki}^2}{(Bi_{1k}^2 + \mu_{ki}^2) J_0(\mu_{ki})}$ , а потім обернене перетво-

рення Фур'є  $\theta^{(k)}(\rho, \eta, Fo_k) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{kn} \cos(v_{kn}\eta) \bar{\theta}^{(k)}$ ,

$A_{kn} = \frac{2(v_{kn}^2 + Bi_{2k}^2)}{L(v_{kn}^2 + Bi_{2k}^2) + Bi_{2k}^2}$ , отримаємо оригінал

системи (12)

$$\theta^{(k)}(\rho, \eta, Fo_k) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} B_{kn} A_{ki} \times \cos(v_{kn}\eta) J_0(\mu_{ki}\rho) Q_{ni}^{(k)}, \quad (14)$$

де

$$Q_{ni}^{(k)} = D_k \cdot \bar{M}'_k \cdot \frac{1 - e^{-w_{ni}^{(k)} Fo_k}}{w_{ni}^{(k)}}.$$

Підсумовуючи (14) по  $k$ , згідно з (5), отримаємо рішення поставленої задачі (2)

$$\theta(\rho, \eta, Fo) = \sum_{k=1}^{\infty} \theta^{(k)}(\rho, \eta, Fo_k), \quad (15)$$

в якому значення  $\theta_p$  визначається з умови, що відносна температура циліндра, яка отримана з рішення задачі, при заданих значеннях  $\rho, \eta$  і  $Fo \rightarrow \infty$ , приймає значення  $\theta_p$ . Тому  $\theta_p$  визначається з рівняння

$$\theta_p = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} B_{kn} A_{ki} \cos(v_{kn}\eta) J_0(\mu_{ki}\rho) R_{ni}^{(k)}, \quad (2.19)$$

$$R_{ni}^{(k)} = D_k \cdot \bar{M}'_k \cdot \frac{1}{w_{ni}^{(k)}}.$$

Частинний випадок отриманого рішення, в якому відсутній високотемпературний теплообмін із навколишнім середовищем завдяки випромінюванню і не враховується термочутливість матеріалу, збігається з точним рішенням. Надалі числові розрахунки виконані для рішення (15) в середовищі Matlab [12] з урахуванням зон I і II.

Результати обчислень із визначення температурного поля трансверсально-ізотропного циліндра, виготовленого з графіту, проаналізовано для трьох випадків залежності теплофізичних характеристик матеріалу від температури:  $A, B$  – трансверсально-ізотропний циліндр;  $C$  – ізотропний циліндр, і значеннями вхідних числових параметрів:

$$R = 0,3; \quad \varepsilon = 0,85; \quad C_{v,0} = 1647002;$$

$$C_v(T) = C_{v,0} + \delta_{c1}T + \delta_{c2}T^2; \quad \beta = 0,25;$$

$$\delta_{c1} = 5333,6, \quad \delta_{c2} = -2,5538; \quad \delta = 1,25;$$

$$A. \lambda_r(T) = \lambda_{r,0} + \delta_{r1}T + \delta_{r2}T^2, \quad \lambda_{r,0} = 261,35,$$

$$\delta_{r1} = -0,3452, \quad \delta_{r2} = 0,0001727;$$

$$\lambda_z(T) = \lambda_{z,0} + \delta_{z1}T + \delta_{z2}T^2, \quad \lambda_{z,0} = 342,41,$$

$$\delta_{z1} = -0,48267, \quad \delta_{z2} = 0,0002454; \quad K = 1,3.$$

$$B. \lambda_r(T) = \lambda_{r,0} + \delta_{r1}T + \delta_{r2}T^2, \quad \lambda_{r,0} = 342,41,$$

$$\delta_{r1} = -0,48267, \quad \delta_{r2} = 0,0002454;$$

$$\lambda_z(T) = \lambda_{z,0} + \delta_{z1}T + \delta_{z2}T^2, \quad \lambda_{z,0} = 261,35,$$

$$\delta_{z1} = -0,3452, \quad \delta_{z2} = 0,0001727; \quad K = 0,76.$$

$$C. \lambda_r(T) = \lambda_{r,0} + \delta_{r1}T + \delta_{r2}T^2, \quad \lambda_{r,0} = 261,35,$$

$$\delta_{r1} = -0,3452, \quad \delta_{r2} = 0,0001727;$$

$$\lambda_z(T) = \lambda_{z,0} + \delta_{z1}T + \delta_{z2}T^2, \quad \lambda_{z,0} = 261,35,$$

$$\delta_{z1} = -0,3452, \quad \delta_{z2} = 0,0001727; \quad K = 1.$$

Експериментально встановлено, що теплообмін випромінюванням є основним способом передачі тепла з температурою вище  $800^\circ C$ ; близько 85–95% тепла передається на поверхню нагріваючих предметів випромінюванням і лише 5–15% конвекцією. Тому було вибрано два значення температури середовища в зональній області і для них – відповідні коефіцієнти тепловіддачі з урахуванням того, що в разі підвищення температури середовища коефіцієнт тепловіддачі зменшується.

$$1. T_c = 800^\circ C (A, C : Sk = 0,028,$$

$$B : Sk = 0,022), B : (Bi_1 = 0,076; Bi_2 = 0,25);$$

$A, C: [\alpha_1 = 87 (Bi_1 = 0,1), \alpha_2 = 218 (Bi_2 = 0,19)];$

2.  $T_c = 1500^\circ C (A, C: Sk = 0,19, B: Sk = 0,14),$   
 $B: (Bi_1 = 0,03; Bi_2 = 0,25);$

$A, C: [\alpha_1 = 35 (Bi_1 = 0,04), \alpha_2 = 218 (Bi_2 = 0,19)].$

Для розрахунку залежності температури по осі циліндра було вибрано три значення часу, для яких також розраховані відповідні критерії Фур'є:

$$T_1 = 57 (A, C: Fo = 0,1, B: Fo = 0,13);$$

$$T_1 = 576 (A, C: Fo = 1, B: Fo = 1,3);$$

$$T_1 = 5671 (A, C: Fo = 10, B: Fo = 13).$$

На наведених графіках введені такі позначення для параметрів і ліній:  $\theta \div TET$ ;  $\rho \div Ro$ ;  $\eta \div et$ ; 1 – пунктирна лінія, позначає лінійне рішення; 2 – штрихпунктирна, позначає нелінійність 1-го роду; 3 – суцільна, позначає рішення з подвійною нелінійністю. Вплив нелінійностей на розподіл відносної температури аналізується на графіках у напрямі знизу вгору. Розрахунки виконані для випадків, коли довжина циліндра і зона нагріву мають такі геометричні розміри:

I.  $l = 2R, \beta = 0,25$ ; II.  $l = 2R, \beta = 0,5$ .

III.  $l = 3R, \beta = 0,25$ .

На рисунках 1–4 видно, що в зоні нагріву має місце значне підвищення температури, причому зі збільшенням часу нагріву різниця температур між лініями 3 і 2 збільшується, що показує, який значний внесок в нагрівання циліндра надає врахування подвійної нелінійності в рішенні задачі нестационарної теплопровідності. Після зони нагріву при наблизенні до торця циліндра різниці температур ліній 1, 2 і 3 значно зменшу-

ються зі збільшенням критерія Фур'є. Оскільки екстремальні теплові навантаження на циліндр відбуваються в разі врахування подвійної нелінійності, аналізувати будемо тільки для цього випадку. Проаналізуємо різниці температур по радіусу циліндра в центрі теплового впливу, а також різницю температур у центрі площини  $\eta = 0$  і торця  $\eta = L$  на поверхні  $\rho = 1$  циліндра (позначимо їх  $\Delta_1, \Delta_2$ ), оскільки відповідні різниці в центрі менше попередніх. Це пов'язано з тим, що в процесі подальшого розрахунку задачі термопружності мають велике значення саме максимальні різниці температур, які мають важливі в подальшому термочинності аналізі конструкцій літальних апаратів.

На рисунках 1 і 2 наведено для анізотропії А залежності відносної температури циліндра від осевої координати при геометричних даних I і значеннях температур середовищ  $T_c = 800^\circ C$  і  $T_c = 1500^\circ C$  в зоні теплового впливу. На рисунках видно, що розташування ліній (2-1-3) у зоні теплового впливу на поверхні циліндра не змінюється для всього часового діапазону. У центрі циліндра, таке розташування ліній відбувається після критерія Фур'є  $Fo = 1$ . Оскільки зі збільшенням температури в зоні теплового впливу збільшується критерій Старка, врахування подвійної нелінійності має суттєвий вплив на розподіл температурних полів у циліндрі, що особливо видно на рисунку 2.

Наведемо значення  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$  для двох значень критерія Фур'є  $Fo = 1$  і  $Fo = 10$ . З цих результатів видно, що зі збільшенням температури середовища збільшуються різниці температур для роз-

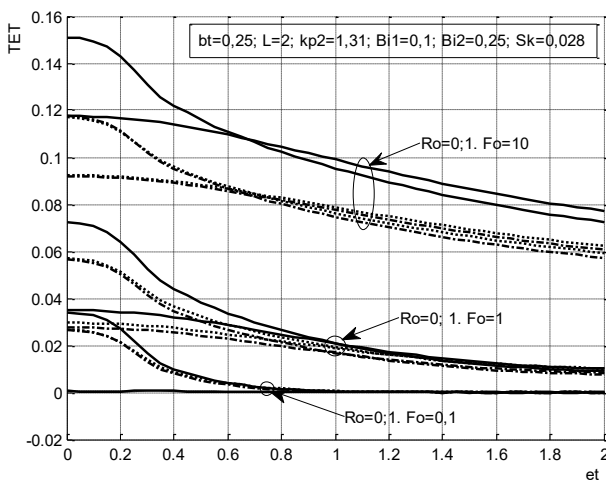


Рис. 1. Залежність  $\theta$  ( $\rho = 0; 1$ ) від критерію  $Fo$  при  $T_c = 800^\circ C$ , анізотропії А і геометричних характеристиках I

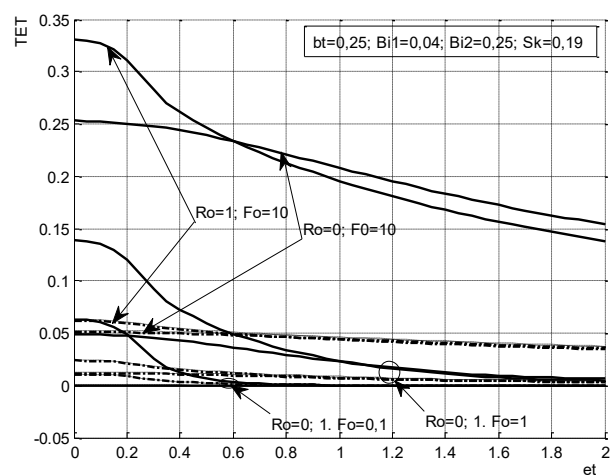


Рис. 2. Залежність  $\theta$  ( $\rho = 0; 1$ ) від критерію  $Fo$  при  $T_c = 1500^\circ C$ , анізотропії А і геометричних характеристиках I

глянутих критеріїв Фур'є  $Fo$ . Значення  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$  для значень критеріїв Фур'є  $Fo=1$  і  $Fo=10$  будуть такими:

$$T_c = 800^\circ C. \quad Fo=1: \quad \Delta_1 = 0,036;$$

$$\Delta_2 = 0,06. \quad Fo=10: \Delta_1 = 0,039; \Delta_2 = 0,084.$$

$$T_c = 1500^\circ C. \quad Fo=1: \quad \Delta_1 = 0,073;$$

$$\Delta_2 = 0,133. \quad Fo=10: \Delta_1 = 0,077; \Delta_2 = 0,193.$$

Причому для  $Fo=1$   $\Delta_1$  збільшується в 2 рази, а  $\Delta_2$  в 2,2 рази; для  $Fo=10$   $\Delta_1$  збільшується в 2 рази, а  $\Delta_2$  в 2,3 рази.

На рисунках 3 і 4 наведено результати, аналогічні попереднім для анізотропії В. Значення  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$  для значень критеріїв Фур'є  $Fo=1,3$  і  $Fo=13$  будуть такими:

$$T_c = 800^\circ C. \quad Fo=1,3: \quad \Delta_1 = 0,034;$$

$$\Delta_2 = 0,068. \quad Fo=13: \Delta_1 = 0,03; \Delta_2 = 0,09.$$

$$T_c = 1500^\circ C. \quad Fo=1,3: \quad \Delta_1 = 0,083;$$

$$\Delta_2 = 0,135. \quad Fo=13: \Delta_1 = 0,07; \Delta_2 = 0,22.$$

Для  $Fo=1,3$   $\Delta_1$  збільшується в 2,4 рази, а  $\Delta_2$  – в 2 рази; для  $Fo=13$   $\Delta_1$  збільшується в 2,3 рази, а  $\Delta_2$  – в 2,4 рази. Таким чином, за умови зростання температури середовища збільшується різниця температур  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$  в середньому від 2 до 2,4 рази, а отже, збільшуються відповідні температурні напруги.

На рисунках 5 і 6 наведено вплив анізотропії на характер розподілу  $\theta$  на поверхні і в центрі циліндра для температур середовищ  $T_c = 800^\circ C$  і  $T_c = 1500^\circ C$ . У зоні теплового впливу для

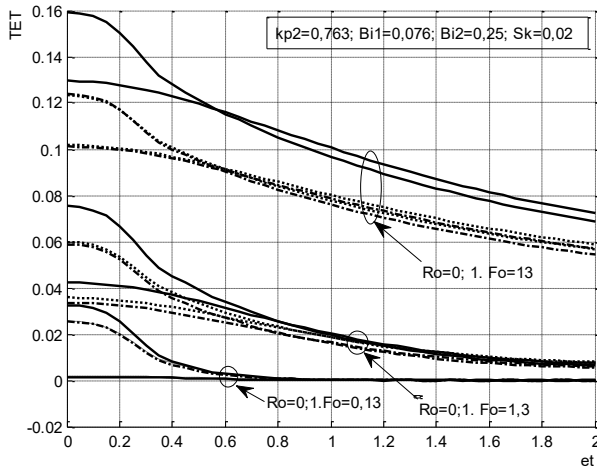


Рис. 3. Залежність  $\theta$  ( $\rho=0; 1$ ) від критерію  $Fo$  при  $T_c = 800^\circ C$ , анізотропії В і геометричних характеристиках І

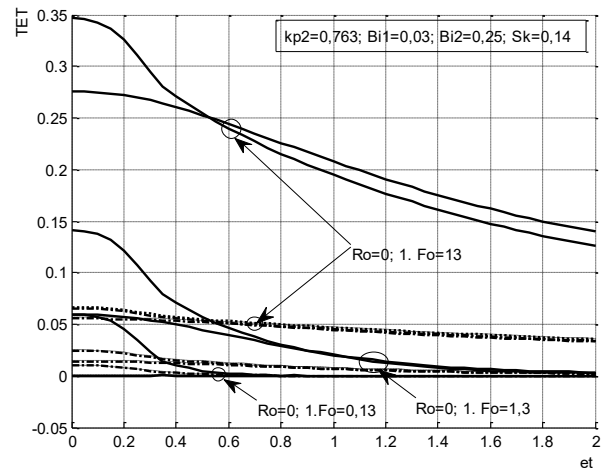


Рис. 4. Залежність  $\theta$  ( $\rho=0; 1$ ) від критерію  $Fo$  при  $T_c = 1500^\circ C$ , анізотропії А і геометричних характеристиках І

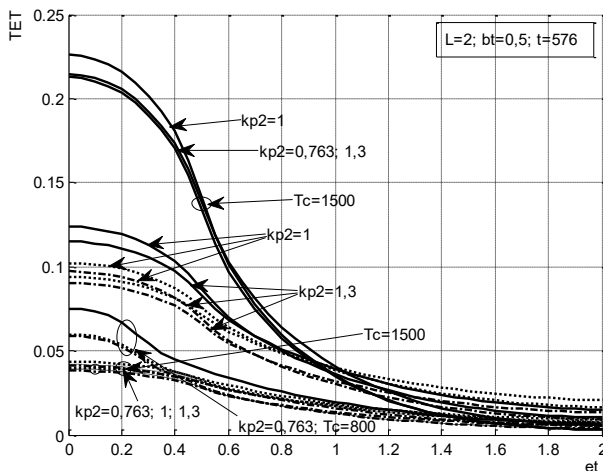


Рис. 5. Залежність  $\theta$  ( $\rho=1$ ) при  $t=576$  для анізотропії А, В, С і геометричних характеристиках ІІ

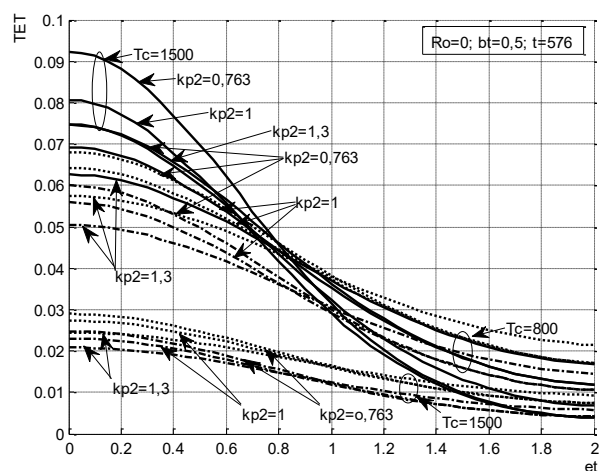


Рис. 6. Залежність  $\theta$  ( $\rho=0$ ) при  $t=576$  для анізотропії А, В, С і геометричних характеристиках ІІ

подвійної нелінійності, на поверхні циліндра, як видно з рисунку 5, розташування ліній для розглянутих анізотропій одне і те ж саме, тобто (В-А-С). Лінія для ізотропного матеріалу С розташована вище порівняно з лініями для трансверсально-ізотропного матеріалу. З підвищенням температури середовища різниця температур між лініями для анізотропій А і В зменшується, прагнучи до мінімального значення, причому лінія для анізотропії А лежить вище порівняно з анізотропією В. Після зони теплового впливу розташування ліній для анізотропій якісно змінюється на (В-С-А), а різниця температур між лініями зменшується для  $T_c = 800^\circ C$  і незначно зменшується для  $T_c = 1500^\circ C$ .

На графіку 6 наведено вплив анізотропії на характер розподілу  $\theta$  в центрі циліндра для тих же температур середовищ. У цьому випадку картина розташування ліній для анізотропій якісно змінюється (А-С-В), причому різниця температур між анізотропіями збільшується. Після зони теплового впливу розташування ліній для анізотропій також якісно змінюється на (В-С-А), а різниця температур між лініями незначно зменшується для розглянутих температур середовищ.

На рисунках 7 і 8 при геометричних даних III і  $N=1$  наведено осьові впливи лінійності, нелінійності 1-го роду, подвійної нелінійності, анізотропії і ізотропії на розподіл температури при  $\rho=0$  і  $\rho=1$  залежно від критерія Фур'є.

На рисунку 7 видно, що для анізотропії В у центрі і поверхні циліндра при температурі  $T_c = 1500^\circ C$  розподіл ліній йде за напрямом (2-1-3) по всій довжині циліндра. Значення  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$

для значень критеріїв Фур'є  $Fo=1,3$  і  $Fo=13$  будуть такими:

$$Fo=1,3: \Delta_1=0,036; \Delta_2=0,081.$$

$$Fo=13: \Delta_1=0,027; \Delta_2=0,173.$$

Причому для  $Fo=1,3$   $\Delta_1$  зменшується, а  $\Delta_2$  збільшується в 2,1 раза.

На рисунку 8, при  $\rho=1$  вплив анізотропій у зонах нагріву буде (В-С-А), а між ними буде якісна зміна на (А-С-В).

**Висновки.** Врахування впливу подвійної нелінійності найбільш адекватно моделює процес високотемпературного теплообміну і тим самим дає змогу інтенсифікувати технологічний процес використання розглянутих матеріалів.

Встановлено, що за умови зростання температури середовища з  $T_c = 800^\circ C$  до  $T_c = 1500^\circ C$ , зростають різниці температур по радіусу циліндра і центральної площини  $\eta=0$  і торця  $\eta=L$  на поверхні циліндра в середньому від 2 до 2,4 раза.

У зоні теплового впливу на поверхні циліндра розташування ліній одне і те ж, тобто (В-А-С). З підвищенням температури середовища, різниця температур між лініями для анізотропій А і В зменшується, прагнучи до мінімального значення, причому лінія для анізотропії А лежить вище порівняно з анізотропією В.

Для анізотропії В у центрі і поверхні циліндра при температурі  $T_c = 1500^\circ C$  розподіл ліній йде за напрямом (2-1-3) по всій довжині циліндра. Значення  $\Delta_1$  для  $Fo=1,3$  зменшується, а  $\Delta_2$  збільшується в 2,1 раза.

При  $\rho=1$  і  $T_c = 1500^\circ C$  вплив анізотропій у зонах нагріву буде (В-С-А), а між ними буде якісна зміна на (А-С-В).

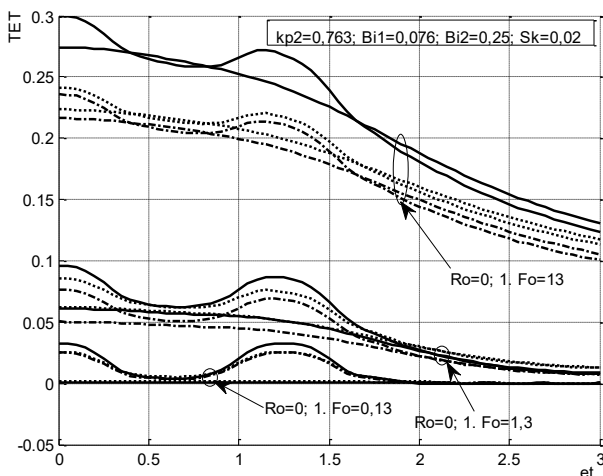


Рис. 7. Залежність  $\theta$  ( $\rho=0; 1$ ) від  $t=576$  при  $T_c = 1500^\circ C$ , анізотропії В і геометричних характеристиках III

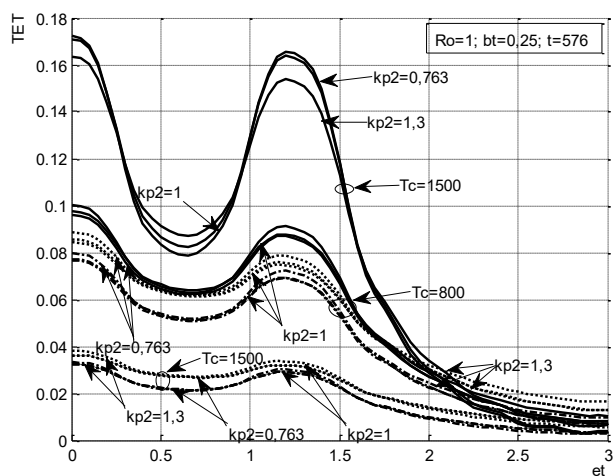


Рис. 8. Залежність  $\theta$  ( $\rho=1$ ) від  $t=576$  при  $T_c = 800; 1500^\circ C$ , анізотропій А, В, С і геометричних характеристик III

Список літератури:

1. Зайцев Е.П. Суперпозиция основных уравнений квазистатической термоупругости анизотропных термочувствительных тел. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Вип. 1 (102). С. 22–31. URL: [http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2017\\_1\\_22-31\\_1-2017.pdf](http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2017_1_22-31_1-2017.pdf).
2. Зайцев Е.П. Влияние тепловой анизотропии и двойной нелинейности на температурное поле сплошного бесконечного трансверсально-изотропного цилиндра. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2016. Вип. 4 (99). С. 23–29. URL: [http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2016\\_4\\_23-4-2016.pdf](http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2016_4_23-4-2016.pdf).
3. Жмуриков Е.И., Бубенков И.А., Дремов В.В. Графит в науке и ядерной технике. Новосибирск, 2013. 194 с.
4. Кушнір Р.М. Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл *Термопружність термочутливих тіл* / Під ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра. Львів : СПОЛОМ, 2009. 409 с.
5. Попович В., Гарматій Г., Кушнір Р. Термопружний стан безмежного кругового термочутливого циліндра за умови конвективно-променевого теплообміну з довкіллям. *Вісник Донецького університету. Сер. А. Природничі науки*. 2008. Вип. 1. С. 113–120.
6. Процюк Б., Горун О. Вплив конвективно-променевого теплообміну на температурне поле півбезмежного термочутливого трискладового тіла за дії джерела тепла. *Математические проблемы механики неоднородных структур* / Под общ. ред. И.А. Луковского, Г.С. Кита, Р.М. Кушніра. Львов : Ин-т прикладных проблем механики и математики им. Я.С. Подстригача НАН Украины, 2014. С. 148–150.
7. Кудинов В.А., Ларгина Е.В. Получение аналитических решений задач теплопроводности с переменными физическими свойствами среды. *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки*. 2011. № 2. С. 186–192.
8. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Учебное пособие. Москва : Наука, 1972. 735 с.
9. Толстов Г.П. Ряды Фурье. Москва : Наука, 1980. 384 с.
10. Ozisik M. Necati Heat conduction. Department of Mechanical and aerospace engineer. North Carolina State University, Raleigh, New York, 1980. 687 p.
11. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел : учеб. пособие. 2-е изд. Москва : Высшая школа, 1985. 480 с.
12. Кетков Ю.Л., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7: программирование, численные методы. Санкт-Петербург : БХВ. Петербург, 2005. 752 с.

**Zaytsev E.P. MATHEMATICAL MODELING OF A DOUBLY NONLINEAR PROBLEM OF UNSTEADY HEAT CONDUCTION OF A TRANSVERSELY ISOTROPIC THERMOSENSITIVE CYLINDER UNDER THE IMPACT OF THE ZONAL HIGH-TEMPERATURE HEAT TRANSFER**

*The article considers the application of the developed approximate analytical method to the solution of the boundary value problem of nonstationary thermal conductivity for a finite continuous transversely isotropic thermosensitive cylinder subject to the influence of zonal convective-radiant heat transfer. The process of energy (heat) transfer is one of the most important areas of modern science and is of great practical importance in the calculation and design of nuclear reactors, aircraft, heat exchangers of various designs. Aviation technology is based on the use of the latest scientific and technical advances in all modern fields of knowledge, as a catalyst for scientific and technological progress in the basic sciences (aerodynamics and gas dynamics, mechanics, solid state physics, etc.) and in applied research (materials science, instrument making, electronics, etc.) Therefore, at the present stage of development of aviation equipment must maximize the strength, reliability and durability of structural elements of the aircraft, which operates under conditions of high-temperature heat transfer. On the way to solving this problem, the transition to higher operating parameters of thermal equipment, it is important to more accurately determine the temperature fields of a solid body and identify the predominant factors of heat transfer. The obtained closed solution in the form of functional dependence, allows to continuously describe in space and time the distribution of temperature fields in a given body, to most fully and adequately identify the influence of all operating factors on temperature distribution, to find dependencies between the most important parameters. then use it to calculate the thermal stress of the body. A large number of numerical calculations performed in the Matlab medium, for two cases of zonal thermal influence in a wide range of Fourier criteria, found qualitative effects of thermal anisotropy, thermal sensitivity of the material and double nonlinearity on the relative temperature distribution along the center and surface of the cylinder. In addition, this method allows you to use it as a test solution for the calculation of complex structural elements.*

**Key words:** thermal conductivity, anisotropy, thermal sensitivity, superposition, Goodman and Kirchhoff transformations, Fourier series.

УДК 629

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/08>**Колісниченко С.Ф.**

Льотна академія

Національного авіаційного університету

**Рагулін С.В.**

Льотна академія

Національного авіаційного університету

**Шарабайко О.М.**

Льотна академія

Національного авіаційного університету

## СИНТЕЗ СИСТЕМИ АКТИВНОГО БІЧНОГО УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ

У роботі розглядається задача підвищення маневреності бічного руху безпілотного літального апарата (БПЛА) за рахунок безпосереднього управління бічною силою. Актуальність цього питання пов'язана з підвищенням вимог щодо бокового управління як по швидкодії, так і по точності, а також виключення побічних явищ, таких як кутові обертання і втрата висоти. Це важливо для безпілотних літальних апаратів, які виконують польоти на малій висоті або ведуть спостереження і фотографування земної поверхні. Вирішення і формалізація опису кінематичних параметрів заснована на диференціальних рівняннях бічного руху літального апарата та математичному моделюванні в системі *Mathlab-Simulink*.

Безпілотні літальні апарати літакового типу мають низку переваг у частині швидкісних, висотних, вагових, технологічних характеристик, однак програють у характеристиках маневреності та керованості.

Підвищення маневрених характеристик безпілотного літального апарата є актуальним завданням для виконання низки спеціальних авіаційних робіт, пов'язаних із точним позиціонуванням і стабілізацією куткового положення літального апарата.

З цією метою в роботі ставиться завдання поліпшити бічну маневреність літального апарата шляхом аналізу можливих засобів керування та відповідних динамічних характеристик та синтезу оптимального управління щодо швидкодії та мінімізації траєкторних помилок. Задля вирішення цієї проблеми використані окремі елементи активного управління літального апарата, в яку входять безпосередньо управління силами, що діють на літальний апарат, адаптація керуючих і аеродинамічних поверхонь та інше.

**Ключові слова:** управління, бічний рух, безпілотний літальний апарат, математичне моделювання, маневрування.

### Аналіз бічного маневрування БПЛА

Характер руху літального апарату та його динамічні характеристики визначаються системою диференціальних рівнянь [1–3]. Рішення рівнянь такого виду пов'язано з труднощами, які включають нелінійність та багатозв'язаність. Цих труднощів можна уникнути за рахунок таких спрощень [4]: розділення руху на поздовжній і бічний; лінеаризація цих рівнянь, що переводить їх у розряд алгебраїчних з усіма спрощеннями для аналізу руху та його моделювання.

Рівняння бічного руху передбачає незалежне управління в каналі крену і в каналі ристання, визначення поступального руху уздовж попе-

речної осі і обертальний рух щодо нормальної і поздовжніх осей.

Рівняння бокового руху (1.1) пов'язують моменти, що діють навколо осі  $Z$  і навколо осі  $Y$ , а також кутові і лінійні параметри – це кутові швидкості і лінійне переміщення. Керуючими сигналами зазвичай виступають кути відхилення керма напряду  $\delta_r$  і відхилення елеронів  $\delta_a$ . Якщо як незбурений рух прийняти прямолінійний горизонтальний політ із малим кутом атаки і кутом тангажу  $V_y = 0$ ,  $V_x = 0$ ,  $V_z = V\beta$ ,  $\Delta V_z = V\Delta\beta$  тоді  $\cos\gamma = 1$ ,  $\cos\vartheta = 1$   $\sin\vartheta = 0$ , і  $\Delta\omega_x = \Delta\dot{\gamma}$ ,  $\Delta\omega_y = \Delta\dot{\psi}$  і рівняння бокового руху набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{\beta} + \Delta\dot{\psi} + a_z^\beta \Delta\beta + a_z^\gamma \Delta\gamma &= 0; \\ \Delta\ddot{\psi} + a_{m_y}^{\omega_y} \Delta\dot{\psi} + a_{m_y}^{\omega_x} \Delta\dot{\gamma} + a_{m_y}^\beta \Delta\beta &= a_{m_y}^{\delta_r} \Delta\delta_r; \quad (1.1) \\ \Delta\ddot{\gamma} + a_{m_x}^{\omega_y} \Delta\dot{\psi} + a_{m_x}^{\omega_x} \Delta\dot{\gamma} + a_{m_x}^\beta \Delta\beta &= a_{m_x}^{\delta_a} \Delta\delta_a; \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} a_z^\beta &= -\frac{1}{mV} \left( \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right), \quad a_z^\gamma = -\frac{g}{V}, \quad a_{m_y}^{\omega_y} = -\frac{1}{I_y} \left( \frac{\partial M_y}{\partial \omega_y} \right); \\ a_{m_y}^{\omega_x} &= -\frac{1}{I_y} \left( \frac{\partial M_y}{\partial \omega_x} \right); \quad a_{m_y}^\beta = -\frac{1}{I_x} \left( \frac{\partial M_y}{\partial \beta} \right); \quad a_{m_y}^{\delta_r} = -\frac{1}{I_y} \left( \frac{\partial M_y}{\partial \delta_r} \right); \\ a_{m_x}^{\omega_x} &= -\frac{1}{I_x} \left( \frac{\partial M_x}{\partial \omega_x} \right); \quad a_{m_x}^{\omega_y} = -\frac{1}{I_x} \left( \frac{\partial M_x}{\partial \omega_y} \right); \\ a_{m_y}^\beta &= -\frac{1}{I_y} \left( \frac{\partial M_x}{\partial \beta} \right); \quad a_{m_x}^{\delta_a} = -\frac{1}{I_x} \left( \frac{\partial M_y}{\partial \delta_a} \right) \square \end{aligned}$$

Задача бокового маневрування може бути вирішена кількома способами:

- чисте управління по крену (в цьому випадку спостерігається ефективно бічне переміщення літального апарату), однак це відбувається з втратою висоти (крива 1);

- управління за допомогою керма напрямку (крива 2), в цьому випадку переміщення в напрямі осі Z відбувається за рахунок відхилення за курсом, в цьому випадку не відбувається втрати висоти, але управління ускладнюється наявністю бокової стійкості, пов'язаної з відновлюючим моментом щодо осі Y;

- маневр щодо лінійного переміщення в напрямі осі Z здійснюється звичайним способом для пілотування літальними апаратами в режимі усталеного віражу (крива 4); в цьому випадку бокове переміщення може відбуватися без втрати, але в цьому разі потрібно застосувати комплексне управління, як бічне по крену, так і поздовжнє для збільшення кута атаки, що запобігає втраті висоти;

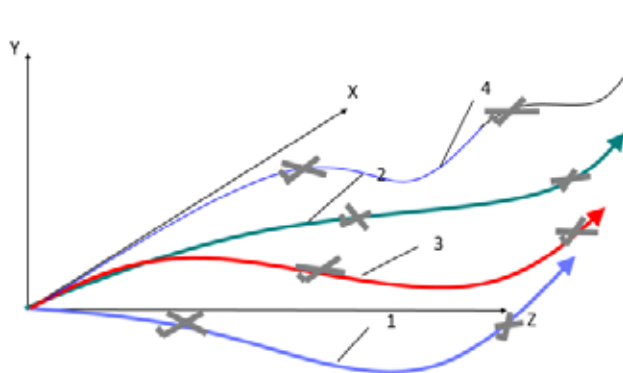


Рис. 1. Загальна схема бокового маневрування БПЛА

- найбільш ефективним і простим методом є метод безпосереднього управління бічною силою; в цьому разі в нас спостерігається високоефективне маневрування за лінійним переміщенням у напрямі осі Z і не спостерігається втрата висоти (крива 3).

Пропонований метод бокового управління (без втрати висоти і без кутового зміщення) є важливим для таких типів безпілотних літальних апаратів, якими є апарати, які виконують авіаційні хімічні роботи, де політ відбувається на висоті 2–5 м і будь-яке управління по крену буде пов'язане з втратою висоти співмірною з висотою польоту величиною, а також літальними апаратами, які виконують спостереження або фотозйомку, для яких кутові зміщення по крену є неприйнятними, а точність по боковому ухиленню потрібна висока.

Загальний вид безпілотного літального апарату з безпосереднім управлінням бічною силою (УБС) представлений на рис. 2, де показані загальний вид і кінематичні параметри руху.

Характерною особливістю конструкції є наявність двох вертикальних стабілізаторів, які дають змогу створити бічну силу Z. При цьому вона не має створювати момент щодо осі Y, тобто без наявності ристання.

Слід врахувати, що ця конструкція має певні особливості:

- для забезпечення шляхової стійкості в нормальном польоті задній стабілізатор повинен мати більші розміри порівняно з нормальною схемою, це пов'язано з погіршенням шляхової стійкості через наявність переднього вертикального стабілізатора;

- для уникнення дестабілізуючого моменту  $\Delta M_y$  управління бічною силою має здійснюватися цільноповоротним переднім стабілізатором і кермом напрямку заднього стабілізатора;

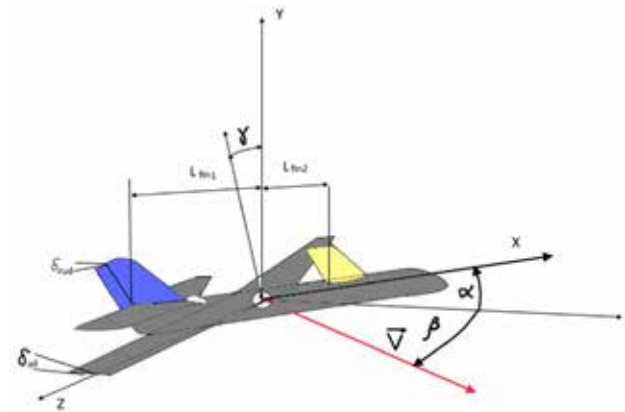


Рис. 2. Загальний вигляд БПЛА безпосереднім УБС



Допустимі такі припущення:

– у разі бічного переміщення з’являється поперечний відновлює момент  $\Delta M_x$  від сили  $Z$ , що діє на вертикальні стабілізатори (для оцінки його величини необхідно провести розрахунки й оцінити ступінь його впливу на  $\omega_x$  і  $\gamma$ );

– шляхова стійкість пропонованої конструкції (без переднього стабілізатора) буде зменшена на величину дисбалансу переднього стабілізатора, в цьому разі задній стабілізатор має бути збільшений у розмірах або передній стабілізатор – працювати у флюгерному режимі за відсутності управління боковою силою.

*Спрощені моделі бічного руху*

На багатьох режимах у разі невеликих відхилень управління по крену і напрямку можна розглядати окремо. Тоді рівняння бічного руху за відсутності ковзання  $\Delta\beta = 0$  можуть бути представлені у вигляді

$$\Delta\dot{\gamma} + a_{m_x}^{\omega_x} \Delta\dot{\gamma} = a_{m_x}^a \Delta\delta_a; \quad (1.2)$$

в другому випадку за відсутності крену  $\Delta\gamma = 0$  (в режимі плоского розвороту) рівняння бічного руху можуть бути представлені у вигляді

$$\begin{cases} \Delta\dot{\beta} + \Delta\dot{\psi} + a_z^{\beta} \Delta\beta = 0; \\ \Delta\dot{\psi} + a_{m_y}^{\omega_y} \Delta\dot{\psi} + a_{m_y}^{\beta} \Delta\beta = a_{m_y}^{\delta_r} \Delta\delta_r; \end{cases} \quad (1.3)$$

Розглянемо спрощену модель координованого розвороту для усунення бокового ухилення. У цьому випадку координований розворот характеризується зміною напрямку руху без втрати висоти. Слід врахувати, що в цьому випадку в пілотованому польоті втрата висоти компенсується управлінням кермом висоти в поздовжньому каналі.

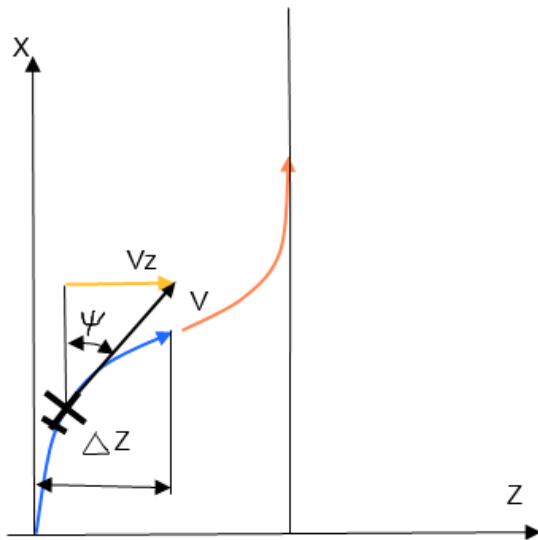


Рис. 3. Схема бокового маневру із застосуванням координованого розвороту

Бічне переміщення в разі координованого розвороту (рис. 3) буде визначатися за формулою

$$\Delta Z = \int_0^t V \operatorname{tg} \psi dt, \quad (1.4)$$

де  $\psi$  – кут рискання,  $V$  – швидкість польоту.

У разі використання крену і ковзання для бокового переміщення рівняння руху у вертикальній і горизонтальній площині будуть виглядати таким чином

$$\Delta H = \Delta Y = \int_0^t V_y dt \quad (1.5)$$

$$V_y = \int_0^t -g(1 - \cos \gamma) dt \quad (1.6)$$

$$\Delta Z = \iint_t g \sin \gamma dt \quad (1.7)$$

У режимі плоского розвороту (рис. 5) бічне переміщення можна визначити за формулою

$$\Delta Z = \int_0^t V \operatorname{tg} \psi dt, \quad (1.8)$$

### Синтез систем управління бічним переміщенням літального апарата

*Розробка моделі БПЛА та визначення її аеродинамічних характеристик*

Для порівняльного аналізу ефективності систем бічного управління як приклад розглянемо безпілотний літальний апарат масою  $m=100$  кг і швидкістю польоту  $V=25$  м/сек. Геометричні характеристики та загальний вигляд літального апарату представлені на рис. 6.

$L = 9\text{m}; b = 0.75\text{m}; L_1 = 2,8\text{m}; L_2 = 2,2\text{m}; b_1 = 1,5\text{m}; b_2 = 1\text{m}$

Площа крила, його профіль були вибрані з умов польоту з максимальною якістю на швидко-

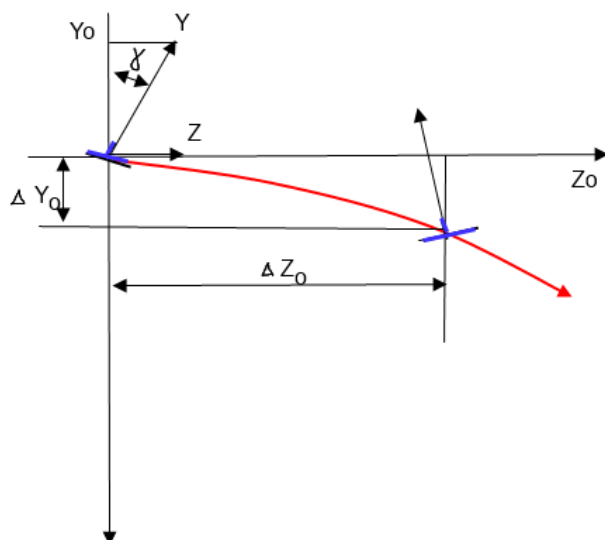


Рис. 4. Схема втрати висоти при бічному русі з використанням ковзання

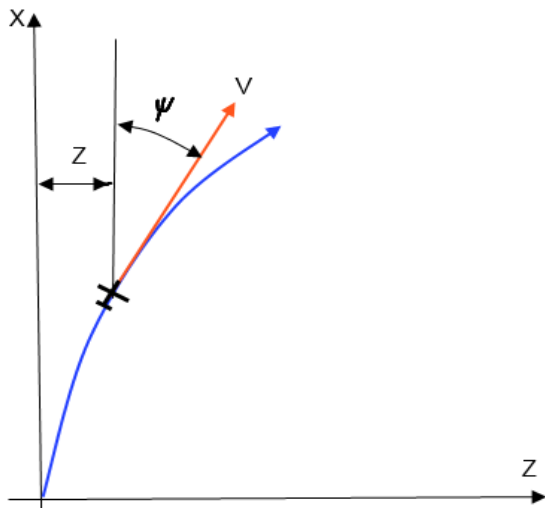


Рис. 5. Схема бічного руху з використанням керма напряду в режимі плоского розвороту

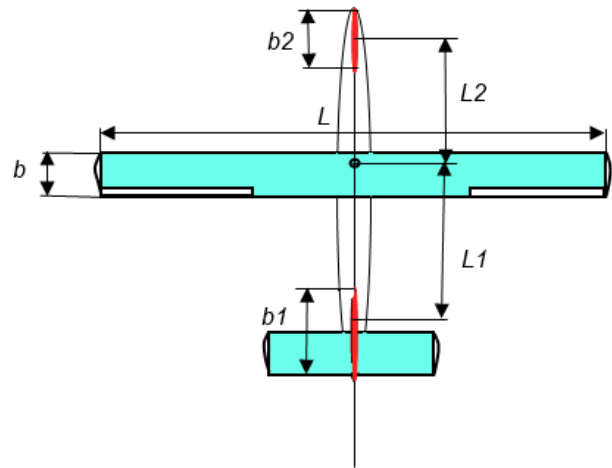


Рис. 6. Загальний вид безпілотного літального апарата і його геометричні характеристики

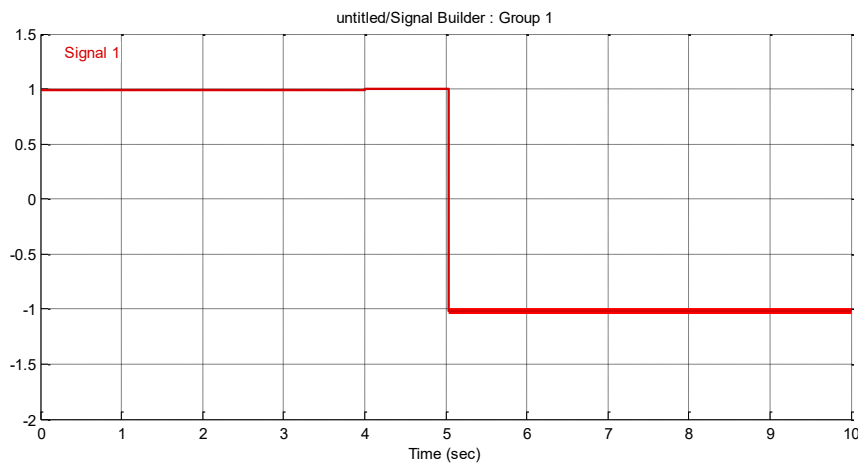


Рис. 7. Схема вхідного сигналу управління, яка забезпечує максимальну швидкодію

сті  $V=25$  м/с. Як профіль крила був вибраний профіль Мупк-12. На крейсерському режимі

$$\alpha = 5^{\circ}; C_y = 0,4; K = 20$$

Для вертикальних стабілізаторів був вибраний симетричний профіль NASA-0015.

Розглянемо бічне управління з використанням різних способів, а саме:

- бічне управління в режимі координованого розвороту;
- бічне ковзання з використанням крену;
- режим плоского розвороту;
- режим безпосереднього управління бічною силою.

Слід зазначити, що будь-яке маневрування оптимізується з позиції мінімуму часу і в цьому випадку буде використовуватися принцип максимуму управління. Час маневру обмежений

10 секундами. За цих умов цільова функція полягає в максимальному значенні бокового зміщення  $\Delta Z_{\max}$ . Максимальний крен – 150. Максимальне відхилення керівних поверхонь – 200.

Для моделювання управління була застосована система Matlab [5; 6].

Як керуючі сигнали забезпечують максимальну швидкодію використовуємо вхідні сигнали релейного типу (рис. 7).

*Моделювання бічного руху з використанням комбінованих розворотів*

Для моделювання ми використовуємо рівняння руху відповідно до формули (1.4), бічне переміщення буде залежати від кута ривання і в разі постійної швидкості вона буде визначається за формулою.

Як видно з графіка, при координованому розвороті і відхиленні елеронів для створення крену

150 через 10 секунд літальний апарат зміщується на  $\Delta Z = 62$  м без втрати висоти.

Моделювання бічного руху літального апарата при ковзанні з креном  $\gamma = 15^\circ$

У цьому разі створюються крен  $\gamma = 15^\circ$ , кут рихання залишається незмінним  $\Delta\psi = 0$ . Через 5 секунд крен змінюється на зворотний, в результаті чого літак відхиляється в бічному напрямі на величину  $\Delta Z = 62$  м та втрачає висоту  $\Delta H = 20$  м (рис. 9, 10).

Моделювання бічного руху літального апарату при плоскому розвороті.

У цьому випадку бічний рух здійснюється за рахунок зміни напрямку шляхом відхилення керма напрямку. Крен при цьому дорівнює нулю  $\Delta\gamma = 0$ .

Цей рух виконується під впливом керуючого сигналу  $\Delta\delta_r$  та протидіючого відновлюваного моменту, який забезпечує шляхову стабільність. Траєкторія при цьому має невизначений характер (рис. 11) у разі осереднення параметрів  $\Delta Z \approx 50$  м

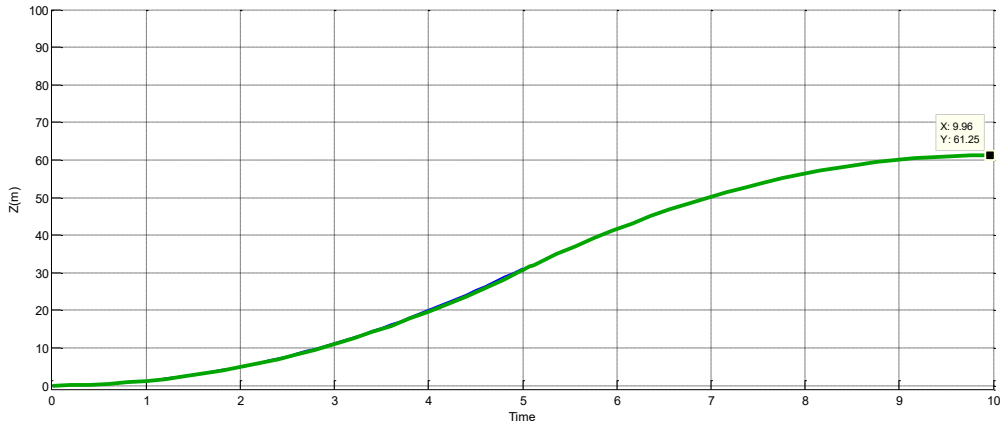


Рис. 8. Графік бічного ухилення при використанні координованого розвороту

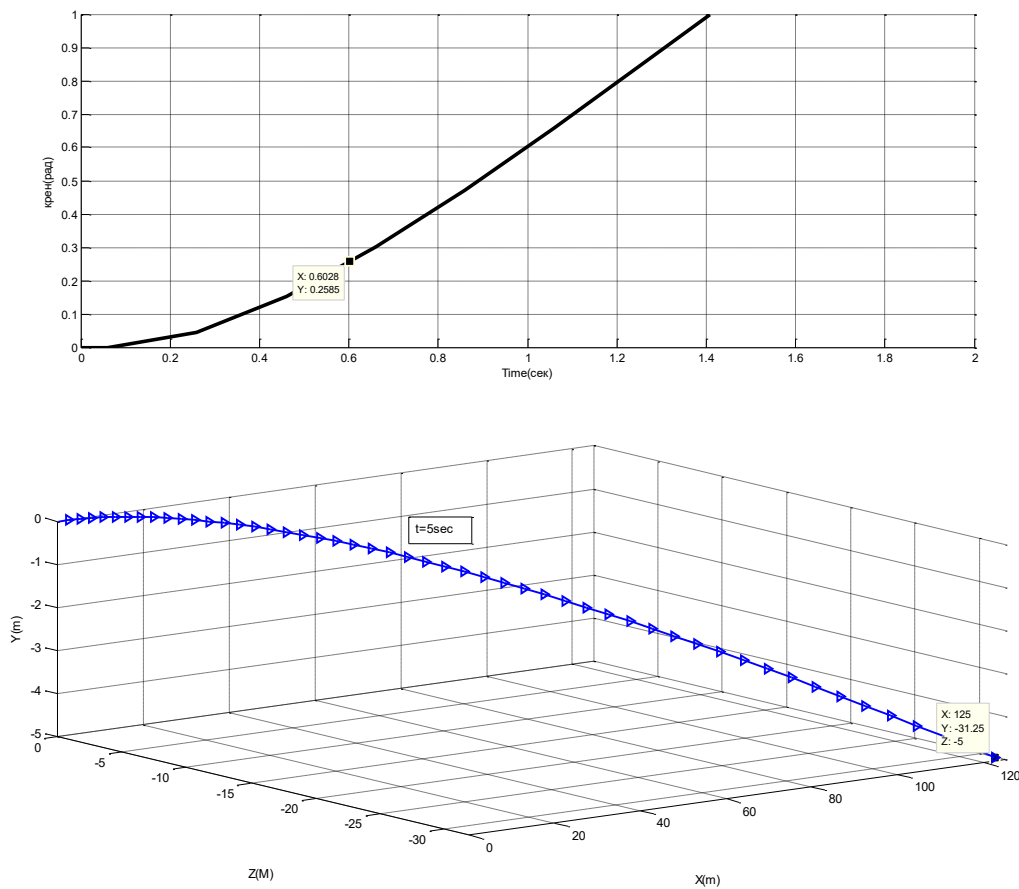


Рис. 9. Графік бічного руху і втрати висоти в разі ковзання протягом t=5 секунд

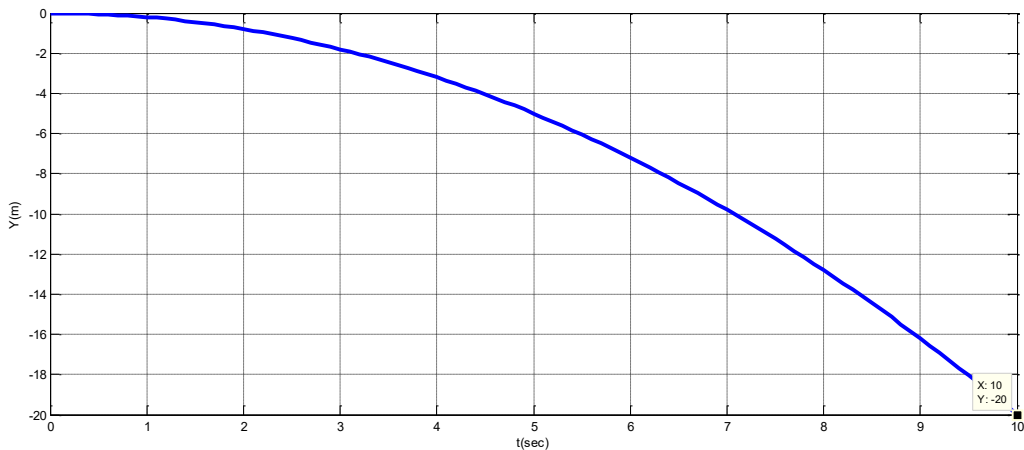


Рис. 10. Графік втрати висоти  $\Delta H$  при ковзанні з креном 15 градусів протягом 10 секунд

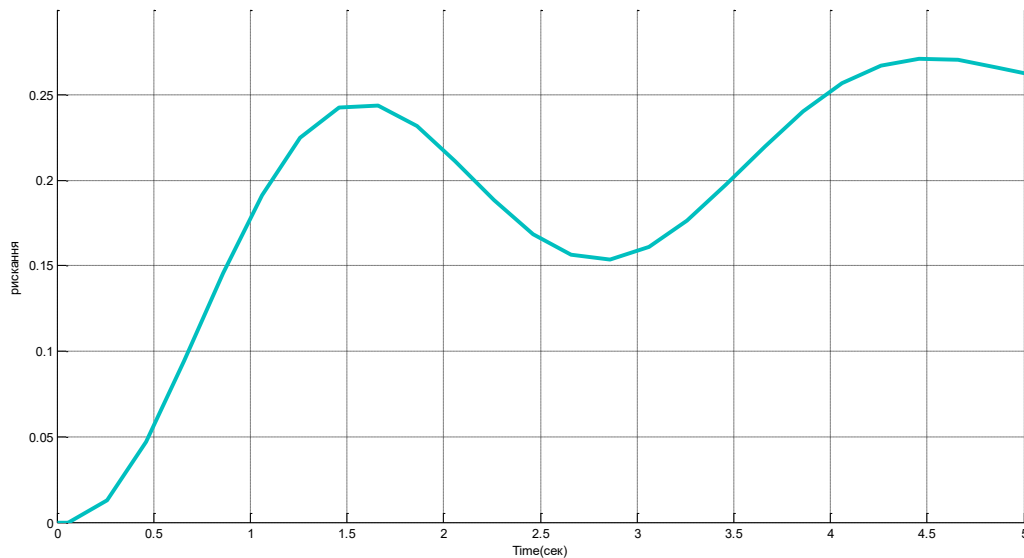


Рис. 11. Зміна кута ристання  $\psi$  при плоскому розвороті

Моделювання бічного руху літального апарата в умовах безпосереднього керування боковою силою.

У цьому випадку ми моделюємо бічне лінійне переміщення в напрямі осі  $Z$  із використанням переднього і заднього стабілізаторів шляхом відхилення керма на пряму і цільноповоротного переднього стабілізатора. Для моделювання розраховуємо силу  $Fz = 250N$ , яка дорівнює бічній силі літака при крені 15 градусів.

У цьому разі ми досягаємо бокового ухилення  $\Delta Z = 60$  м через  $t=10$  секунд, що характерне для літака з маневром в режимі координованого розвороту. При цьому значно спрощується управління, воно здійснюється тільки по одному лінійному каналу та відсутні втрати висоти і обертання літака навколо будь-яких осей (рис. 12).

де

$$\omega^2 = a_{m_y}^\beta + \frac{1}{T_\beta T_\psi};$$

$$a_{m_y}^\beta = -\frac{1}{I_y} \left( \frac{\partial M_y}{\partial \beta} \right); \quad \Delta M_y = C_{yst}^\beta \frac{\rho V^2}{2} S_{st} \Delta \beta$$

Для визначення площі керуючих поверхонь переднього і заднього вертикальних стабілізаторів  $S_{st1,2}$  використовуємо значення необхідних керуючих сил  $F_{st1,2}$ , тоді при  $F_{st1}=110N$ ;  $F_{st2}=140N$ ; необхідна площа поверхонь дорівнює  $S_{st1}=0.57m^2$   $S_{st2}=0.36m^2$ .

**Висновки.** Для підвищення маневреності безпілотних літальних апаратів при підвищених вимогах щодо якості траєкторного керування необхідні вдосконалені системи та елементи управління польотом.

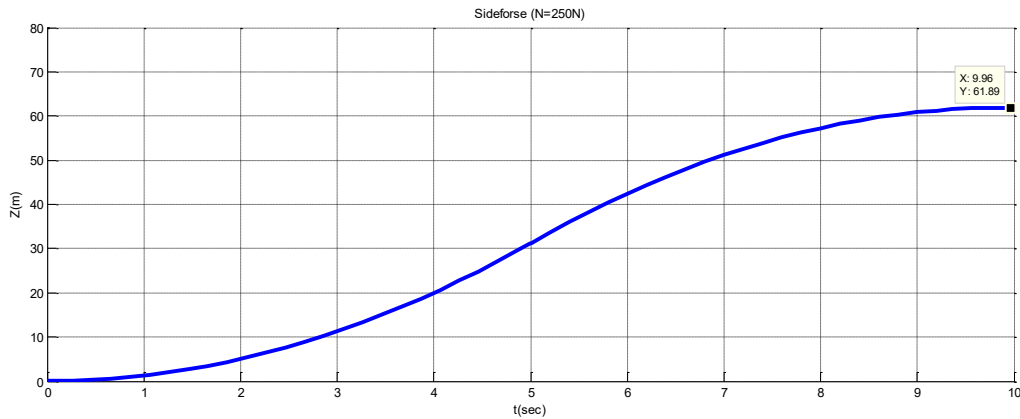


Рис. 12. Графік бокового маневру БПЛА з використанням безпосереднього управління бічною силою  $F_z$

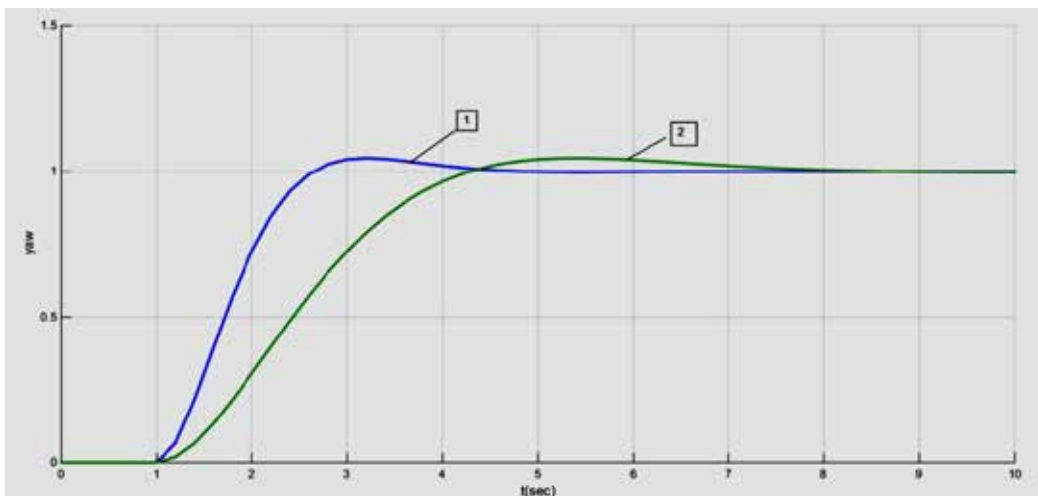


Рис. 13. Графік бокового маневру БПЛА з різними стабілізуючими характеристиками:  
 1 –  $\omega = 2; \zeta = 0.7$ ; 2 –  $\omega = 1; \zeta = 0.7$ ;

У роботі проведено аналіз різних методів бічного маневрування з оцінкою кінематичних і геометричних параметрів, а саме:

- управління за допомогою координованого розвороту;
- управління за допомогою ковзання;
- управління в режимі плоского розвороту;
- управління за допомогою безпосередньо діючої бічної сили.

Для оцінки динамічних характеристик різних методів керування процесів використане моделювання БПЛА з  $m_{зл} = 100$  кг.

На практичному прикладі виконаний розрахунок аеродинамічних та керуючих елементів.

Отримані характеристики перехідних процесів дають змогу зробити висновок про перевагу активного управління за допомогою бічної сили в частині безпеки польотів на малій висоті, швидкодії, стабілізації кутового положення, що

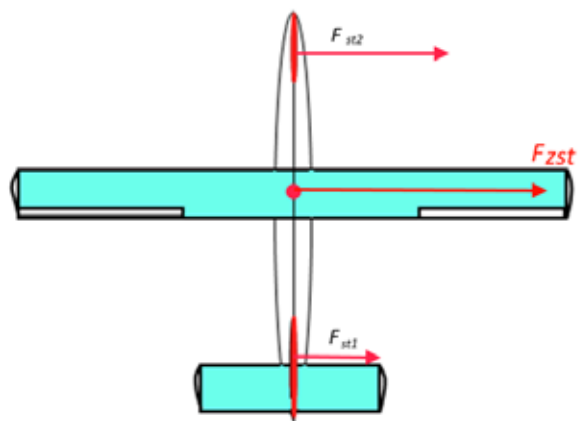


Рис. 14. Схема дії керуючих сил при боковому маневру БПЛА з використанням безпосереднього управління  $F_z$

є важливими та необхідними якостями в процесі виконання загальних та спеціальних авіаційних завдань.

**Список літератури:**

1. Летов А.М. Динамика полета и управление Москва : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1969. 360 с.
2. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Аэродинамика: динамика продольного и бокового движения. Москва, «Машиностроение», 1979. 352 с.
3. Пашковский И.М. Устойчивость и управляемость самолета. Москва: «Машиностроение», 1975. 328 с.
4. Красовский А.А., Вавилов Ю.А., Сучков А.И. Системы автоматического управления летательных аппаратов. Типография ВВИА имени Н.Е. Жуковского, 1986. 472 с.
5. Тунік А.А., Абрамович О.О. Основи сучасної теорії управління. Київ : НАУ, 2010. 260 с.
6. MatLab. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

**Kolesnychenko S.F., Rahulin S.V., Sharabaiko A.N. SYNTHESIS OF AN ACTIVE SIDE CONTROL SYSTEM FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE**

*The article examines the problem of increasing the maneuverability of the lateral motion of the unmanned aerial vehicle (UAV) due to direct control of lateral force. The relevance of this issue is associated with an increase in the requirements for side management, both on the speed and precision, as well as the exclusion of side effects such as angular rotation and loss of height. This is important for unmanned aerial vehicles that perform flights in small height or leading observation and photographing the earth's surface. The solution and formalization of the description of the kinematic parameters is based on differential equations of the side movement of the aircraft and mathematical modeling in the Matlab-Simulink system.*

*Unmanned aerial vehicles of an aircraft type have a number of advantages in the part of high-speed, high-rise, weight, technological characteristics, but lose in characteristics of maneuverability and controllability.*

*Increasing the maneuverable characteristics of a unmanned aerial vehicle is an urgent task for a number of special aviation works associated with the exact positioning and stabilization of the angular position of the aircraft.*

*To this end, the task of improving the lateral maneuverability of the aircraft by analyzing possible controls and relevant dynamic characteristics and the synthesis of optimal control over the performance and minimization of trajectory errors. In order to solve this problem, separate elements of active aircraft control are used, which includes direct control of the forces operating on the aircraft, adaptation of managers and aerodynamic surfaces and more.*

**Key words:** control, side movement, unmanned aerial vehicle, mathematical modeling, maneuvering.

UDC 621.43.031.3(045)

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/09>**Olali N.V.**

Niger Delta University

**Osaisai E.F.**

Niger Delta University

**Olali M.O.**

Niger Delta University

## SYNTHESIS OF AUTOMATIC SYSTEM OF ANTI-SURGE PROTECTION FOR THE AVIATION GTE

*Gas-dynamic stability of compressors of aircraft gas turbine engines is one of the most important conditions that determines their reliability and level of flight safety. Pumping phenomena in the gas turbine engine leads to a loss of traction, accompanied by an increase in gas temperature in front of the turbine and an increase in vibration and mass flow along the engine path. The work allows a small probability of surge, but it is proposed to equip gas turbine engines with emergency surge protection systems.*

*When creating high-pressure compressors, special attention is paid to ensuring high efficiency and the required margin of gas-dynamic stability in the entire range of changes in the modes of operation of the gas turbine engine during operation. The solution to this problem while maintaining large values of the degree of pressure increase in the compressor is associated with the need to ensure optimal flow of the line of operating modes on the characteristics of the engine compressor. When creating an automatic anti-surge system used as a control factor – the change of fuel supply to the combustion chamber of the engine. Because it has the most significant effect on the gas-dynamic stability of the compressor.*

*The proposed system for controlling the position of the line of operating modes, which can be included as a component in the digital electronic system of automatic control of the engine, which will ensure its gas-dynamic stable operation throughout the operating range. To prevent surges, an automatic device is proposed that allows you to detect surges at an early stage – pre-surge. In the work, the pre-surge is considered as the transition of the operating point across the boundary of the design margin of stability in this mode of operation of the engine. The adiabatic efficiency of the compressor is considered as a diagnostic sign of pre-surge. The device for implementing this algorithm registers the values of pressures and temperatures of the inhibited flow at the inlet and outlet of the compressor and the speed of the rotor. It is proposed to use an ionic anemometer to measure the flow rate.*

*The capabilities of the proposed system can be expanded by using a temperature sensor of the inhibited flow behind the compressor. That is, the developed combined device based on an ionic anemometer can be used both to solve the problem of determining the actual margin of gas-dynamic stability of the compressor stage and as a sensitive element of the control system of aviation gas turbine engines, which prevent surges.*

**Key words:** aircraft gas turbine engine, surge, pre-surge, gas-dynamic stability, line of operating modes, automatic surge warning device.

**Introduction.** Gas-dynamic stability of compressors of aircraft gas turbine engines (GTE) is one of the most important conditions that determines their reliability and level of flight safety. Unstable operation of the compressor in the engine system, the so-called surge, causes intense fluctuations in the pressure of the working fluid in the flow part or gas-dynamic shocks. Surge is the cause of engine shutdown in flight, fire or burning of the turbine blades [1; 2].

Analysis of the causes of surge compressors of aircraft GTE shows that in most cases in the process of development of this phenomenon there are events

that consistently complicate the situation in flight. According to statistics [1], more than 70% of aviation events occur due to a combination of several adverse factors. Usually this set of several different factors is related to the activity of the crew, the functional efficiency of the GTE and flight conditions.

**Analysis of research and publications.** As shown by the results of studies presented in [1–4], surge phenomena in the GTE lead to thrust penalty, accompanied by an increase in gas temperature in front of the turbine and increased vibration levels as a result of large amplitudes of pressure pulsations and

mass flow through the engine passage. The possibility of these phenomena is a serious obstacle to increasing the reliability of the GTE in particular and flight safety in general (4).

Short-term loss of thrust in the event of a surge on one of the engines for a multi-engine aircraft or even for a single-engine in the case of sufficient to bleed off the reserves of altitude and speed does not lead to a catastrophic situation [1]. However, an increase in the temperature in the turbine and an increase in vibration can lead to burnout of the turbine nozzles and other failures [2]. Usinf aircraft experience [2–4] shows that especially unacceptable for the engine is an unacceptable increase in gas temperature in front of the turbine.

**Setting objectives.** To increase the stability margins of the aircraft reserve factor the following options are used [4; 6]: control of the compressor guides, air bleed off from the individual booster spool, adjustable dosing of fuel supply at start-up modes, throttle intake, etc. These measures reduce the likelihood of surges, but cannot guarantee their elimination, as surges may be the result of failures in the systems themselves to prevent disruptions. In addition, the increase in stability margins leads to a significant reduction in the efficiency of the compressor and, accordingly, the efficiency of the GTE [4].

Therefore, it is advisable to allow a small probability of surge, but to equip the GTE with emergency surge protection systems and ensure maximum efficiency of the engines [6].

Thus, we formulate the research objectives as the following – to create an automatic system of anti-surge protection for the aircraft GTE.

**Automatic anti-surge protection system for the aviation GTE.**

When creating high-pressure compressors, special attention is paid to ensuring high efficiency and the required margin of gas-dynamic stability in the entire range of changes in the modes of operation of the gas turbine engine during operation. The solution to this problem while maintaining large values of the degree of pressure increase in the compressor is associated with the need to ensure optimal flow of the operating line (OL) on the characteristics of the engine compressor. The displacement of the OL at the intake leads to a decrease in the stock of gas-dynamic stability of the booster spool. To prevent surges, the displacement of the OL in transient modes must be ensured within safe limits by limiting the rate of change of the engine mode and adjusting the compressor.

Existing aircraft engines do not have high-speed OL position control systems based on the booster

spool characteristics. Active control of the AeroDerivative Gas Turbine with digital automatic control systems (ACS).

The most promising are continuous closed control systems for axial compressors in terms of parameters that characterize the state of air flow in the compressor or behind it. The NGTE Institute, together with *Rolls-Royce* and *General Electric*, has conducted tests to substantiate the feasibility of using the number  $M$  on a compressor or its individual spool as an adjustable parameter.

The application of this parameter in the control systems of the axial compressor is due to the fact that the number  $M$  uniquely corresponds to each value of the reduced rotor speed and decreases monotonically when approaching the operating point to the limit of gas-dynamic stability of the compressor. This allows when approaching OL to the limit of stability to form a preemptive command to control the compressor by reducing the number of  $M$  to a certain value.

A typical dependence of the number  $M$  on the reduced air flow at the inlet to the compressor is shown in fig. 1.

Thus, as controlled parameters in the system of closed control of axial compressors it is supposed to use value of number  $M$  of an air stream on each spool of the compressor.

The number  $M$  is determined by the formula:

$$M = \frac{C}{\sqrt{kRT}}, \tag{1}$$

$$\text{or } M = \frac{1}{\sqrt{\frac{kRT^*}{c^2} - \frac{k-1}{2}}}; \tag{2}$$

$$\text{or } M = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[ \left( \frac{1}{1 - \frac{\Delta P}{P_k^*}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \tag{3}$$

$$\text{where } T = T^* - \frac{C^2}{\frac{2k}{k-1} R}.$$

To determine the number  $M$  of air flow in the cross section of the compressor surge, it is advisable to use the developed combined device (Fig. 1), which allows measuring the temperature of the stagnant flow and its speed, and formula (2). In contrast to the existing method of determining the number  $M$  [7] using formula (3) and the ratio of static pressure drop  $\Delta p$  to the full  $p^*$ , the proposed method allows to increase the speed of the ACS and the accuracy



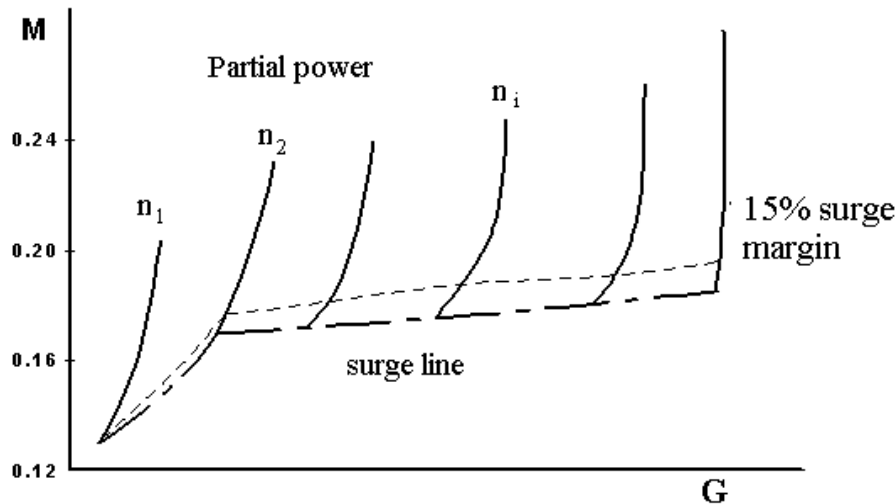


Fig. 1. Compressor characteristics

of measurements by eliminating the operation of smoothing the pressure pulsations of periodically non-stationary air flow.

The following can be used as control factors in compressor operating:

- air passage from the inner circuit of the low pressure compressor (LPC) (from the cavity at the outlet of the connected stages) through the adjustable sash to the outer circuit;
- air passage from the intermediate stages of the high pressure compressor (HPC) in the outer circuit;
- change of angle of installation of blades of the adjustable directing device of the first degree of HPC;
- change of fuel supply to the combustion chamber of the engine.

The first control factor can be used to prevent a surge or rotating failure in the HPC.

The control of the position of the operating line modes of the HPC can be carried out at low engine operating modes by the second control factor, and at higher modes – by the third.

The most significant effect on the margin of gas-dynamic stability of the compressor has a change in fuel supply to the combustion chamber. This control factor can be used to remove the HPC from the surge when the influence of other means on the mode of operation of the compressor is insufficient.

Thus, the existing surge protection systems [4] include sensors that respond to the rate of change of air pressure behind the compressor and when the parameter is reached  $A = \Delta p_{\kappa} / p_{\kappa}^* \Delta t \geq 7$ , influencing the fuel-regulating equipment, reduce the engine operation mode to 0.7 nominal and switch on the “ENGINE SURGE” light board. Operating mode 0.7 nominal is chosen for the reason that it is in this mode

in most engines the maximum margin of gas-dynamic stability of the compressor.

According to the developers of such a system, reduce the engine operating mode to the mode in which the condition  $\Delta K_y = \Delta K_{y_{max}}$  is met, will eliminate the surge. This is only true in the event of a compressor surge in the presence of certain external disturbances. If the surge is caused by damage to the structural elements of the flowing part of the compressor or shading of the inlet device, then reducing the operating mode of the engine will not ensure the output of the compressor from the surge. In addition, this method of engine control cannot be recommended for modern GTE with a small combustion chamber volume. Small masses of air connected to the compressor do not allow eliminating the surge, if it has already begun.

Therefore, the proposed method of OL control at the stage when the surge has not yet developed, is the most promising for gas turbine engines of any type.

The functional diagram of the closed system of automatic control of the compressor of a low pressure of the two-shaft turbofan engine (TFE) is given in fig. 2, and the scheme of the closed ACS for HPC – accordingly in fig. 3, where TS is a temperature sensor of the stagnant flow (TS); SS is the sensor of speed of an air stream (SS); SM is a sensor number  $M$  air flow (SM); SD is a software device that generates the output and the maximum achievable for this mode of operation of the engine number  $M$  of the air flow at the outlet of the compressor surge (SD); EC is an element of comparison of real and minimum numbers  $M$ ;  $\Sigma$  is a mismatch signal amplifier;  $EM_1$ ,  $KS_1$  – the executive mechanism and the controlling body of the control system of the air bypass flaps from the



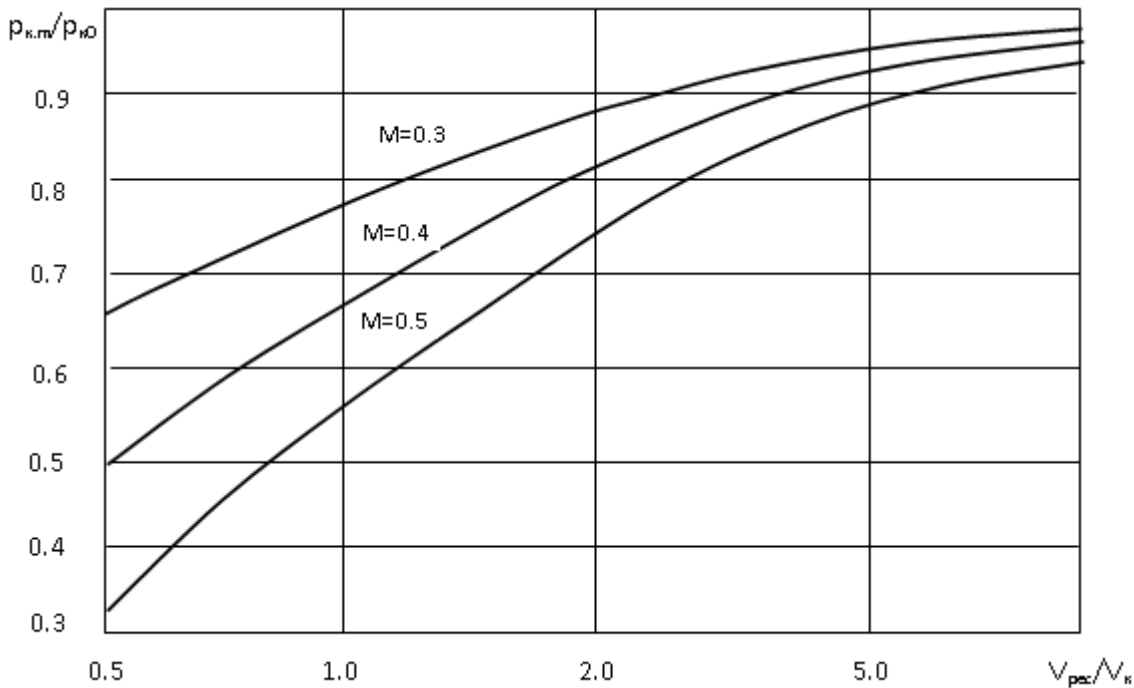


Fig. 4. Conditions of surge (reverse flow) in the compressor

These results show that the more connected the volume of the working fluid behind the compressor compared to its own volume, the smaller the rupture of the characteristics of the compressor, the reverse flow occurs. A similar result occurs when reducing the calculated flow rate in the compressor.

The amount of bleed off air into the outer circuit, including from the HPC (Fig. 4), can vary, providing  $\Delta K_y = \Delta K_{ymin}$ . In this case, the reduction in engine thrust is negligible and occurs smoothly rather than discretely, as was the case with the relay control circuit of the air bleeding means. This engine control not only increases the level of flight safety, but also reduces fuel consumption.

The proposed OL position control system can be included as a component in the digital electronic ACS [8] of the engine, which will ensure its gas-dynamic stable operation in the entire range of operating modes.

#### Synthesis of the anti-surge ACS device.

To prevent surges, a fragment of ACS, which allows detecting surges at an early stage is proposed. Below the theoretical references and directly a fragment of the ACS are proposed.

The loss of gas-dynamic stability of GTE compressors is preceded by pre-surge [5]. Pre-surge occurs when the compressor is operating on the left ascending branch of the characteristic, and the reason for its appearance is the presence of fluctuations in the flow, ie small deviations of parameters from their average values. For example, when operating

the compressor stage on the left ascending branch of the characteristic, if the value of the relative flow velocity in front of the impeller blades is less than average, the pressure created by these blades will decrease, and there is a pre-surge.

The methods currently used make it possible to capture the surge, rather than the pre-surge, which reduces the time to remove the compressor from the breakdown mode and reduces the level of flight safety. Automatic control systems (ACS) are used to bring the compressor out of the breakdown mode, in which the opening of air bypass valves, change of installation angles of adjustable inlet guides and guide devices, change of fuel consumption are used as control factors [5].

Because surges lead to flight events, there is a need to develop devices for earlier detection. As the analysis of literature sources shows [1–7], research in the field of detection of pre-surge phenomena is very relevant.

The causes of pre-surge are changes in the geometric dimensions of the elements of the flow part of the gas turbine, uneven field parameters at the compressor inlet, non-stationary flow in transient modes, foreign objects entering the inlet device, failure of the supersonic inlet device, decreasing Reynolds number, increasing humidity. The most difficult task is to find diagnostic signs of parameters that would characterize the pre-surge state of GTE compressors.

In [2], the pre-surge is considered as the transition of the operating point across the boundary of

the design margin of stability at a given mode of operation of the engine. The adiabatic efficiency of the compressor is considered as a diagnostic sign of pre-surge  $\eta_R$ . To determine its value, the following formula is used:

$$\eta_{\kappa} = \frac{\left( \pi_{\kappa}^{* \frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{\left( \frac{T_{\kappa}^{*}}{T_{ex}^{*}} - 1 \right)},$$

The instability boundary is set in the form of inequality;

$$\eta_{\kappa} > A, \quad (4)$$

where  $A$  – set limit value.

The essence of the method [2] is to determine the difference between the values of efficiency and the degree of pressure increase  $\pi_{\kappa,sp}^{*}$  on the border of stability and current values  $\pi_{\kappa}^{*}$  and efficiency for a given reduced rotor speed. Variable  $\Delta\eta_{\kappa} = (\eta_{\kappa,sp} - \eta_{\kappa})$  characterizes the possible margin of stability in terms of efficiency by the value of the constant in inequality (4). Time  $\Delta t$ , at which the operating point reaches the limit of stability, is determined by the rate of change of current values  $\eta_{\kappa}$ ,  $\pi_{\kappa}$  and variables  $\Delta\eta_{\kappa}$ ,  $\Delta\pi_{\kappa} = (\pi_{\kappa,sp} - \pi_{\kappa})$ . Setting the value  $\Delta t$ , get the condition for the forecast of the surge:

$$\begin{aligned} (\eta_{\kappa,sp} - \eta_{\kappa}) &> k_1 \eta_{\kappa}; \\ (\pi_{\kappa,sp} - \pi_{\kappa}) &> k_2 \pi_{\kappa}, \end{aligned} \quad (5)$$

where  $k_1, k_2$  – coefficients of proportionality.

The device for implementing this algorithm registers the values of pressures and temperatures of the stagnant flow at the inlet and outlet of the compressor and the speed of the rotor and includes a device for differentiation, multiple, two computing and limit devices. The signal from the output of the multiple device is formed by the usual reduction formula  $n_{np} = n \sqrt{288/T_{ex}^{*}}$ . The limit device compares the values  $\pi_{\kappa}$  and  $\pi_{\kappa,sp}$ .

At the output of the first computing device, a value  $\eta_{\kappa}$  is formed, and at the output of the second –  $\eta_{\kappa,sp}$ , depending on the turnover frequency  $n_{np}$ .

A pre-surge signal is generated when signals from both limit devices appear.

In the considered method of recognition of pre-surge phenomena on the basis of control of adiabatic efficiency of the compressor it is offered to use the worst limit of stability. However, during operation, as a result of the influence of several of the above factors, the shift of the stability limit may exceed the calculated value. In this case, the device operating according to algorithm (5) will detect the surge with a delay.

The disadvantage of this method is that the authors do not take into account the shift of the stability limit during operation due to the factors that cause pre-surge.

In [8] to determine the pre-surfing state T-shaped pressure sensors are used, and which allow recording the rotational failure and determine whether or not there is a countercurrent. The beginning of the countercurrent corresponds to the zero value of the dynamic pressure on the T-shaped sensor.

The start of the surge can also be taken as the moment of increasing the pressure at the inlet to the compressor, which is fixed by the sensor. Time interval  $\Delta t$  from the beginning of the transient process or the occurrence of a rotational failure [2] to the occurrence of surges is calculated by the formula [3].

$$\Delta t \approx \frac{l V_N}{a V_C kM} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{p_{\kappa,m} / p_{\kappa,0}}{\left(1 - \frac{p_{\kappa,m}}{p_{\kappa,0}}\right)} \cdot \frac{4}{\left(\frac{2}{kM^2} \frac{V_N}{V_C} - 1\right)}}},$$

where  $l$  – compressor length;  $M, a$  – the average length of the compressor Mach number and speed of sound;  $V_N$  – network volume or output receiver;  $V_C$  – compressor volume;  $p_{\kappa,0}$  – the average pressure of the stagnant flow behind the compressor in steady-state operation immediately before the stability boundary;  $p_{\kappa,m}$  – the average pressure of the stagnant flow behind the compressor after disturbance of steady work.

This time is for the compressors of aviation GTE and allows providing protection of the compressor from surges using electronic digital automatic control systems and autonomous servos of the air bleeding valves [8].

However, the use as a signal that would reflect the approach of the operating point to the limit of stability, the magnitude of the pressure drop or dynamic pressure has a number of disadvantages. In the case of reverse flow in a few milliseconds after the appearance of instability, the pressure behind the compressor has time to fall by only 3–5% of the original value [7]. The duration of the reverse flow is 20–30% of the surge period. The change in pressure by 3–5% coincides with the error of the measuring path, in this case the pre-surge will be recorded with some delay.

It is also worth noting that the pressure behind the compressor drops not only with the appearance of instability, but also when the combustion chamber is turned off or the restrictions in the ACS are triggered, which can lead to erroneous operation of the surge prevention system. Thus, it can be concluded that the most suitable signal to disrupt the steady operation of

the compressor is to change the direction of flow rate behind the compressor. In this regard, the author proposes a scheme of the ACS fragment for early detection and prevention of surges (see Fig. 5), which uses an ionic anemometer as a speed meter, which allows us to determine the direction of flow [8].

The proposed method uses the fact that a measure of the flow rate in the ionic anemometer is the redistribution of current at electrodes 1 and 2. The means of ionization in the anemometer is a central electrode made in the form of a cylindrical rod having a region of curvature. According to the theory of corona effect, when a high voltage is applied from the power supply to the central electrode, a corona effect appears with the occurrence of a unipolar charge in the outer discharge zone between the central and two symmetrically arranged galvanically separated electrodes 1 and 2. Electrodes 1 and 2 receive unipolarly charged ions, the charge sign of which depends on the polarity of the voltage at the Central electrode.

At zero flow velocity as a result of volumetric pushing of the unipolar charge on electrodes 1 and 2 (Fig. 5) ions from the Central electrode fall evenly

and the current is equal ( $I_1 = I_2$ ). A measure of the flow rate is the redistribution of current at the electrodes depending on the magnitude of the speed and direction of flow.

At a steady current in the compressor as a result of attrition wear of ions there is a redistribution of current strength on electrodes, i.e current strength  $I_2$  at electrode 2 becomes greater than the current load  $I_1$  on the electrode 1 ( $I_2 > I_1$ ).

The numerical value of the flow rate in the cross section at the outlet of the compressor stage is determined by formula (1).

The calculation of the speed is carried out in a computing device (Fig. 5), the signals to which come from the electrodes 1 and 3 through the matching device. The matching device provides signal encoding.

To prevent damage to the electronic units of the proposed device in the event of a breakdown in the ionic anemometer used supports  $R_1$  i  $R_2$ , equal in value.

With a steady flow, the value of the flow velocity  $c$  has a positive value, and with the appearance

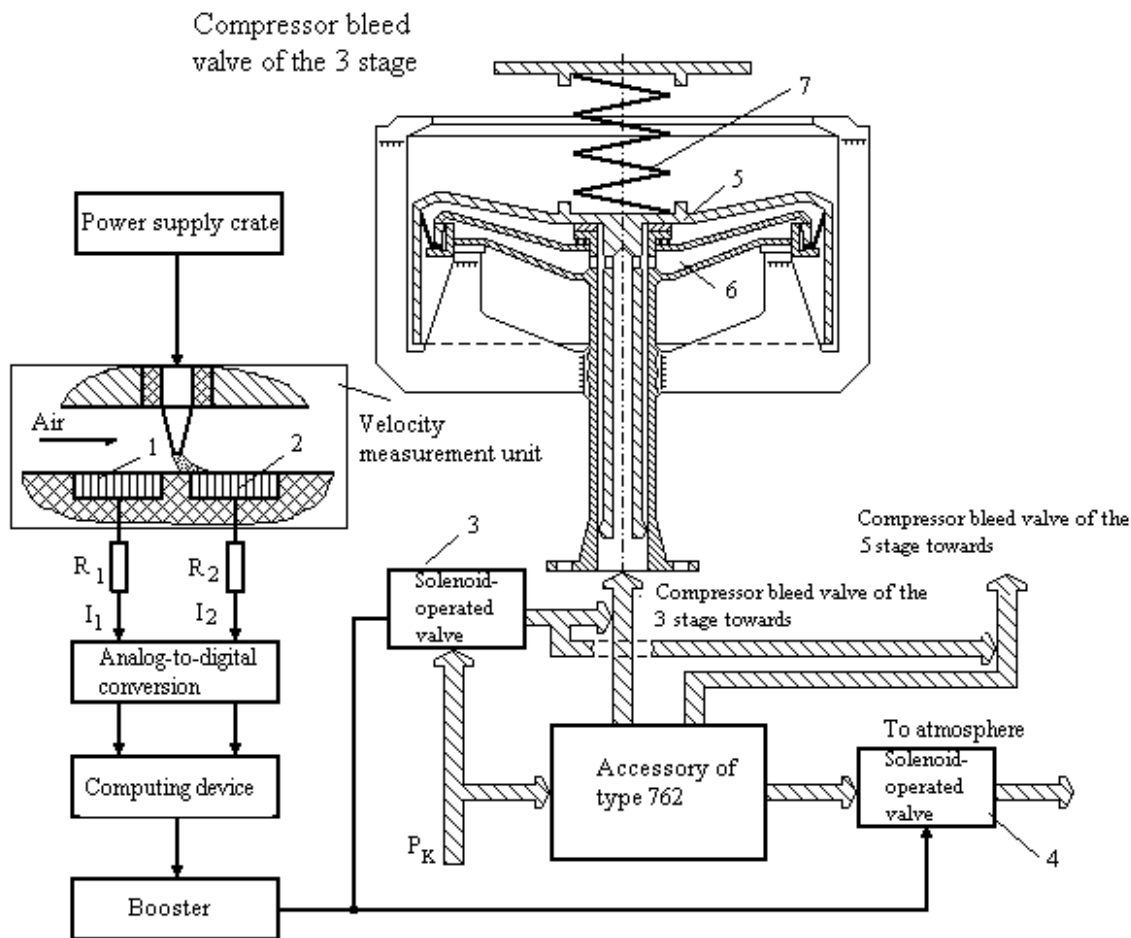


Fig. 5. Scheme of automatic surge warning device

of instability, as indicated above, the direction of the flow changes. In this case ( $I_1 > I_2$ ) the computing device generates an amplified signal and is fed to the solenoid valve 4.

When the solenoid valve 4 is opened, the sealed cavities of the air bypass bleed valves installed in the 3rd and 5th stages of the high-pressure compressor are connected to the atmosphere, and the tributary 5 is squeezed by the spring 7 and the air bypass bleed valves open. After the normal operation of the compressor, when ( $I_2 > I_1$ ), in the computing device, a signal is generated to open the solenoid valve 3 and close the valve 4. When opening the valve 3, the air taken from the compressor under pressure  $p_k$  is fed into the sealed cavities of the air bypass bleed valves 6 and they close.

If the engine has adjustable guides of the first stages of the high pressure compressor or adjustable propelling nozzle [1] and digital electronic ACS, for example, type FADEC [8], which implements the control principle for deviation of controlled parameters, the proposed device for measuring speed can be used in such a control system. In this case, it is possible to more effectively control the position of the line of operating modes, and hence the margin of stability of the compressors. At the steady operation of the compressor, control of valves of bypass bleeding of air is carried out by the accessory of type 762 MA in a regular mode

depending on physical frequency of rotation of a rotor of a high pressure.

**Conclusions.** Methods are offered, and functional schemes of fragments of automatic control systems of GTE are developed, providing control of position of lines of working modes, on characteristics of cascades of compressors, and also allow to warn a surge at an early stage.

This system for recognition and prevention of pre-surge phenomena and, accordingly, surge, can be integrated into the digital electronic ACS aviation GTE [8], which performs the following operations:

- conversion of analog signals coming from sensors into discrete (digital) signals;
- calculation of values of inconsistency between measured and calculated values of controlled and limited parameters;
- conversion of digital values of control actions into analog electric signals;
- conversion of analog electrical signals into hydraulic signals;

The capabilities of the proposed system can be expanded by using a temperature sensor of the stagnant flow behind the compressor. That is, the developed combined device based on an ionic anemometer can be used both to solve the problem of determining the actual margin of gas-dynamic stability of the compressor stage and as a sensitive element of the ACS aviation GTE, which allow us to prevent surges.

#### References:

1. Кулик Н.С. Параметрические методы оценки технического состояния авиационных ГТД. Киев : КИИГА, 1993. 139 с.
2. Осик В.М., Панін В.В., Хаммуд Н. Оцінка впливу зміни геометричних розмірів елементів ГТД в експлуатації на його газодинамічну стійкість. *Вісник Київського міжнародного університету цивільної авіації*. 1999. № 1. С. 15–20.
3. Волянська Л.Г., Панін В.В., Гаюен Сунь. Методи і засоби підвищення газодинамічної стійкості компресорів газотурбінних двигунів : монографія. Київ : НАУ, 2005. 200 с.
4. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. Москва : Химия, 1974. 416 с.
5. Горбановский В.Б., Панин В.В., Чумак О.И. Методика количественной оценки загрязнений элементов проточной части ПС–90А. Киев : КИИГА, 1990. 79 с.
6. Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока. Москва : Машиностроение, 1996. 380 с.
7. Терещенко Ю.М., Мітрахович М.М. Авіаційні газотурбінні двигуни. Київ : КВІЦ, 2001. 312 с.
8. Olali N.V., Olali M.O., Orukari M., Jumbo E.E. A model of compressor blades contamination in aviation GTE in operation. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. 2018. № 6. Vol. 29 (68).

#### Олалі Н.В., Осайсай Е.Ф., Олалі М.О. СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ АНТИПОМПАЖНОГО ЗАХИСТУ Авіаційного ГТД

*Газодинамічна стійкість компресорів авіаційних газотурбінних двигунів є однією з найважливіших умов, що визначає їх надійність і рівень безпеки польотів. Помпажні явища в ГТД призводять до втрати тяги, супроводжуються зростанням температури газів перед турбіною і підвищенням рівня вібрацій і масових витрат по тракту двигуна. У роботі допускається невелика ймовірність виникнення помпажа, але запропоновано обладнати ГТД аварійними системами антипомпажного захисту.*

Під час створення високонапірних компресорів особливу увагу приділяють забезпеченню високого ККД та необхідного запасу газодинамічної стійкості у всьому діапазоні зміни режимів роботи ГТД в процесі експлуатації. Вирішення цієї задачі за збереження великих значень ступенів підвищення тиску в компресорі пов'язане з необхідністю забезпечити оптимальне протікання лінії робочих режимів на характеристиці компресора двигуна. Під час створення автоматичної антипомпажної системи використано як керуючий фактор зміну подачі палива в камеру згоряння двигуна, оскільки він має найбільш значний вплив на запас газодинамічної стійкості компресора.

Запропонована система керування положенням лінії робочих режимів, що може бути включена як компонент у цифрову електронну систему автоматичного керування двигуна, що забезпечить його газодинамічно стійку роботу у всьому діапазоні експлуатаційних. Для попередження помпажу пропонується автоматичний пристрій, що дозволяє виявляти помпаж на ранній стадії – передпомпаж. У роботі передпомпаж розглядається як перехід робочої точки через границю розрахункового запасу стійкості на цьому режимі роботи двигуна. В якості діагностичної ознаки передпомпажа розглядають адіабатичний ККД компресора. Пристрій для реалізації цього алгоритму реєструє величини тисків і температур загальмованого потоку на вході і виході з компресора і частоту обертання ротора. Для вимірювання швидкості потоку пропонується використовувати іонний анемометр.

Можливості запропонованої системи можуть бути розширені при використанні датчика температури загальмованого потоку за компресором. Тобто розроблений комбінований пристрій на базі іонного анемометра може бути використаний як для вирішення завдання визначення фактичного запасу газодинамічної стійкості каскаду компресора, так і в якості чутливого елемента системи керування авіаційних ГТД, які дозволяють попереджати помпаж.

**Ключові слова:** авіаційний газотурбінний двигун, помпаж, передпомпаж, газодинамічна стійкість, лінія робочих режимів, автоматичний пристрій попередження помпажу.

УДК 622.83

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/10>

**Чумаченко С.М.**

[orcid.org/0000-0002-8894-4262](https://orcid.org/0000-0002-8894-4262)

Національний університет харчових технологій

**Мошенський А.О.**

[orcid.org/0000-0002-4584-4958](https://orcid.org/0000-0002-4584-4958)

Національний університет харчових технологій

**Гуйда О.Г.**

[orcid.org/0000-0002-2019-2615](https://orcid.org/0000-0002-2019-2615)

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Мушка А.О.**

[orcid.org/0000-0002-5167-6583](https://orcid.org/0000-0002-5167-6583)

Національний університет харчових технологій

## РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ АВІАЦІЙНОГО ПОШУКУ І РЯТУВАННЯ В УКРАЇНІ

*Система авіаційного пошуку і рятування є складною організаційно-технічною системою, що передбачає координовану взаємодію багатьох органів державного підпорядкування та структурних підрозділів самої Державної служби України з питань надзвичайних ситуацій та Міністерства внутрішніх справ. Тому для більш ґрунтовного аналізу та успішної реалізації пропозицій щодо підвищення ефективності функціонування системи авіаційного пошуку і рятування ця система як об'єкт дослідження повинна бути насамперед адекватно описана, повинні бути побудовані повні і несуперечливі її моделі – структурно-функціональна та імітаційна. Для цього в роботі розроблено базу даних авіаційних інцидентів, інформаційно-логічну модель та створено імітаційну модель.*

*Розроблена концептуальна та логічна модель бази даних про авіаційні інциденти дає змогу просто відстежувати смислові зв'язки між сутностями предметної області, а саме бази даних про авіаційні інциденти, полегає сам процес створення бази даних. Запропонована база даних дозволить вирішувати низку прикладних завдань, зокрема використовуватися для оцінки надійності тих чи інших повітряних засобів, планування оптимального розміщення пошуково-рятувальних повітряних суден Державної служби України з питань надзвичайних ситуацій на території України тощо.*

*Структурно-функціональна модель системи авіаційного пошуку і рятування розроблена в програмному середовищі ERwin Process Modeler, що, на відміну від існуючих, більш точно деталізує структуру системи та описує процес функціонування кожного елементу системи авіаційного пошуку і рятування в Україні. Запропонована модель може використовуватися для аналізу ефективності діяльності органів управління, застосування сил та засобів під час проведення пошуково-рятувальних робіт.*

*Завдяки розробленій імітаційній моделі системи авіаційного пошуку і рятування в програмному середовищі Arena Simulation можна імітувати процес функціонування органів управління в режимі реального часу з реальними характеристиками.*

**Ключові слова:** авіаційний пошук і рятування, системи авіаційного пошуку і рятування, авіаційний інцидент, інформаційно-логічна модель, імітаційна модель.

**Постановка проблеми.** Перш ніж проводити реорганізацію системи авіаційного пошуку і рятування (САПІР) або впроваджувати певні інформаційні системи (ІС) та технології, необхідно вивчити й описати існуючий стан, а потім запропонувати (спроєктувати) нову структурно-функціональну модель органів управління та імітаційну модель процесів функціонування, можливо,

з використанням сучасних ІС. Для оцінювання ефективності авіаційного пошуку і рятування пропонується застосувати системний підхід [1].

Головним підходом до дослідження таких складних об'єктів вважається структурно-системний аналіз (ССА) [2]. Зазвичай перед ССА ставиться завдання описати існуючий стан речей (об'єкт управління) – побудувати так звану модель



«як є» («AS-IS») і запропонувати нові рішення за структурою управління або технології виконання процесів функціонування – побудувати модель «як повинно бути» («TO-BE»). При цьому САПіР буде розглядатися як складна система, що функціонує на основі певної множини процесів взаємодії органів управління, сил та засобів авіаційного пошуку і рятування (АПіР). Завданням реорганізації є переведення системи в деякий цільовий стан, що характеризується, як правило, цільовою функцією, що забезпечує якісно більш високий рівень організації роботи за рахунок [3]:

- підвищення ефективності процесів функціонування АПіР;
- рекомендацій щодо удосконалення організаційної структури системи управління, спрямованої на підтримку виконання процесів АПіР;
- створення інформаційної системи підтримки прийняття рішень щодо забезпечення виконання процесів АПіР.

Удосконалення технології роботи САПіР зводиться до всебічного аналізу функцій управління на предмет [3]:

- необхідності та достатності функцій управління;
- виключення їх дублювання і паралелізму;
- визначення вузьких місць і проблемних питань перерозподілу функцій управління;
- повноти уявлення і раціонального розподілу за рівнями функцій планування, контролінгу та ін.;
- визначення витрат ресурсів та часу на виконання конкретних функцій;
- аналізу функцій з погляду трудомісткості і складності.

Вирішення цих питань є основоположним під час розроблення шляхів підвищення ефективності функціонування САПіР. На них базуються вдосконалення організаційної структури органів управління, удосконалення інформаційних потоків та документообігу, підготовка вихідних даних для автоматизації.

У ССА розглядаються функціональні, інформаційні та динамічні моделі, а також моделі функціонально-вартісного аналізу (АВС-моделі). Розглянемо основні ідеї і принципи їх побудови та застосування до опису функціонування САПіР.

**Метою статті** є створення структурно-функціональної моделі системи авіаційного пошуку та рятування в Україні, яка передбачає розроблення не тільки моделі самої системи, а цілого комплексу суміжних моделей, що включає логіко-інформаційну модель авіаційного інциденту, структурну

модель бази даних про авіаційні інциденти, функціональну модель САПіР із застосуванням методологій IDEF0 та IDEF3, імітаційну модель САПіР із застосуванням комп'ютерного середовища Arena Simulation. Весь цей інструментарій буде основою для аналізу «слабких» місць САПіР, розроблення пропозицій щодо її реорганізації з метою підвищення ефективності функціонування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показав, що для того, щоб описати роботу цієї складної системи, не втрачаючи точності і повноти, опис повинен бути доступний як фахівцю-аналітику, проектувальнику і програмісту, так і замовнику, кінцевому користувачеві системи. І в цьому полягає найбільша складність. Зокрема, системний аналітик стикається з проблемами, що взаємопов'язані (і це є однією з головних причин їх важковирішуваності) [5].

Із системного аналізу систем відомо, що під час дослідження системи використовується так звана стратифікація, за якої опис об'єкта проводиться пошарово, починаючи з першого шару (страти). У результаті утворюється деяка ієрархічна структура (наприклад, як на рис. 1).

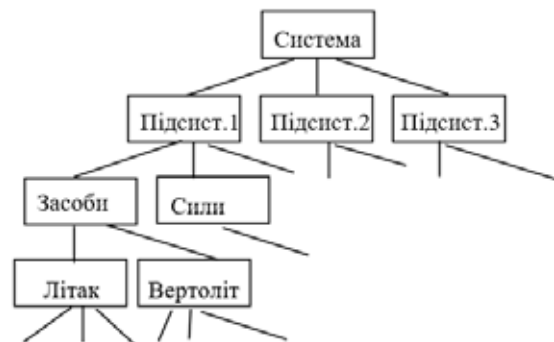


Рис. 1. Приклад ієрархічної структури системи

### Виклад основного матеріалу.

**Розроблення логіко-інформаційної моделі авіаційного інциденту.** З позиції логіко-математичної теорії систем процес ліквідації наслідків аварійної ситуації можна розглядати як строго закономірний ланцюг причинно-наслідкових подій. Причинно-наслідкові відносини і зв'язки завжди мають якісну і кількісну сторони, які знаходяться в діалектичній взаємозалежності. Математичний апарат системної логіки розглядає тільки двійкові змінні і функції, число операцій над ними зводиться до невеликого числа простих.

Ланцюг зміни станів системи «Людина – повітряне судно (ПС) – навколишнє середовище» (див. рис. 2) з урахуванням дії небезпечних і шкідливих чинників середовища є моделлю її розви-

тку в процесі авіаційного інциденту, пов'язаного з припиненням польоту ПС на траєкторії польоту і в районі аеродрому.

Стан системи може зазнавати низку послідовних змін, або етапів розвитку:

– **1-й етап (E1)** – політ. Стан  $C_0$  – політ ПС. Стан  $C_1$  – виникнення авіаційного інциденту. На цьому етапі органами обслуговування повітряного руху (ОПР) здійснюється оголошення стадії невизначеності: уточнення інформації у органів ОПР, Координаційного центру пошуку і рятування цивільної авіації (Збройних Сил України) (КЦПР ЦА (ЗСУ)) та ін.; визначення подальшої стадії аварійної ситуації.

– **2-й етап (E2)** – розвиток аварійної ситуації на ПС:  $C_2$  – ситуація, що характеризується втраченою стійкістю, керованістю ПС;  $C_3$  – аварійна ситуація, що вимагає негайного припинення польоту;  $C_6$  – благополучне завершення польоту. Також на цьому етапі органами ОПР здійснюється оголошення стадії тривоги, з можливим переходом у стадію лиха, залежно від розвитку ситуації; інформування про подію керівництва та органів управління, а також отримання інформації від органів ОПР про:

- тип, позивний, державний реєстраційний номер ПС;
- маршрут, істинний курс, висоту, швидкість польоту ПС;
- фактичний час відправлення і розрахунковий час прибуття;
- склад екіпажу і чисельність пасажирів;
- точка останнього радіолокаційного (РЛ) спостереження, радіозв'язку.

Також здійснюється визначення аеродромів, з яких необхідно залучення пошуково-рятувальних ПС. Чергові пошуково-рятувальні сили приводять в готовність № 1.

– **3-й етап (E3)** – наслідки припинення польоту ПС:  $C_p$  – руйнування ПС;  $C_4$  – перерваний зліт;  $C_5$  – аварійне гальмування;  $C_6$  – аварійна посадка (на сушу, воду). На цьому етапі органами ОПР оголошується стадія лиха, здійснюється: розрахунок зони пошуку ПС, що зазнало лиха; оцінка метеорологічних умов; постановка завдання екіпажу пошуково-рятувального повітряного судна (ПРПС); початок пошуку ПС, що зазнало лиха; інформування ТГУ(ТУ) ДСНС про:

- авіаційну подію і координати імовірного району пошуку;
- введення в дію плану реагування на надзвичайну ситуацію, пов'язану з авіаційною подією.
- **4 етап (E4)** – евакуація людей з аварійного ПС.  $C_7$  – введення в дію плану рятувальних робіт.
- **5 етап (E5)** – наслідки аварії ПС:  $C_8$  – загибель людей;  $C_9$  – травмування людей;  $C_{10}$  – збереження життя і здоров'я людей.

Силами ДСНС здійснюється евакуація постраждалих та надання їм допомоги.

Математично розвиток системи (див. рис. 2) можна представити системою рівнянь, що описує умови настання і збереження подій:

$$\left. \begin{aligned} Y_{C_6} &= (a_{6,0} \wedge a_{1,0}) \cdot Y_{C_0} \vee Y_{C_1} \cdot b_{6,1} \vee Y_{C_6} \cdot a_{6,6} \\ Y_{C_2} &= Y_{C_0} \cdot a_{1,0} \vee Y_{C_1} (b_{2,1} \wedge b_{1,0} \vee Y_{C_2} \cdot b_{2,1}) \vee Y_{C_2} \cdot a_{2,2} \\ Y_{C_3} &= Y_{C_0} \cdot a_{1,0} \vee Y_{C_1} \cdot b_{3,1} \vee Y_{C_2} \cdot b_{3,2} \vee Y_{C_3} \cdot a_{3,3} \\ Y_{C_4} &= Y_{C_0} \cdot a_{1,0} \vee Y_{C_1} \cdot b_{2,1} \vee Y_{C_3} \cdot b_{4,3} \vee Y_{C_4} \cdot a_{4,4} \\ Y_{C_5} &= Y_{C_3} \cdot b_{5,3} \vee Y_{C_5} \cdot a_{5,5} \\ Y_{C_6} &= Y_{C_3} \cdot b_{6,3} \vee Y_{C_6} \cdot a_{6,6} \\ Y_{C_7} &= (Y_{C_4} \cdot b_{7,4} \vee Y_{C_5} \cdot b_{7,5} \vee Y_{C_6} \cdot b_{7,6}) \vee Y_{C_7} \cdot a_{7,7} \\ Y_{C_8} &= Y_{C_2} \cdot P_{8,2} \vee Y_{C_7} \cdot P_{8,7} \vee Y_{C_9} \cdot P_{9,8} \vee Y_{C_8} \cdot a_{8,8} \\ Y_{C_9} &= Y_{C_7} \cdot b_{7,9} \vee Y_{C_9} \cdot a_{9,9} \\ Y_{C_{10}} &= Y_{C_6} \cdot d_{10,6} \vee Y_{C_7} \cdot b_{10,7} \vee Y_{C_9} \cdot b_{10,9} \vee Y_{C_{10}} \cdot a_{10,10} \end{aligned} \right\} (1.1)$$

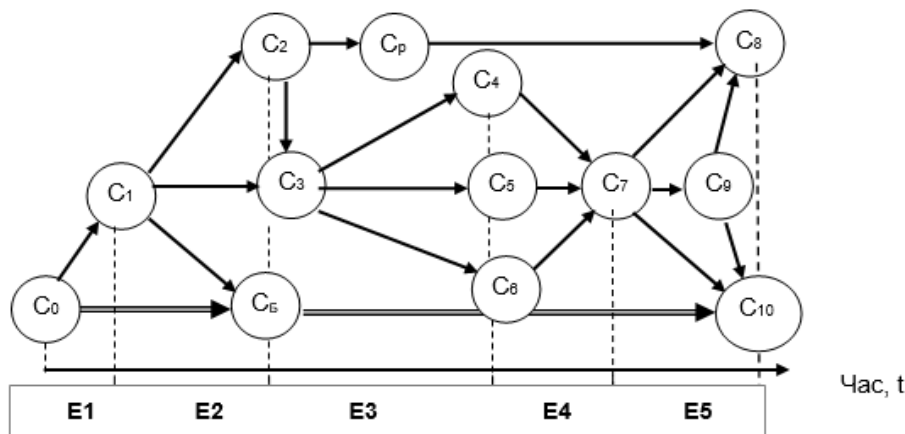


Рис. 2. Ланцюг зміни стану системи «Людина – ПС – середовище» в процесі виконання польоту

$$Y_{c_p} = a_{1,0} \cdot Y_{c_0} \vee Y_{c_1} \cdot b_{2,1} \vee Y_{c_p} \cdot a_{p,p}$$

де  $Y_{c_i}$  – бінарна функція, що описує  $i$ -тий стан;  
 $a_{ij}$ ,  $b_{ij}$ ,  $d_{ij}$ ,  $P_{ij}$  – бінарні функції, що описують настання  $i$ -го стану (наслідку) залежно від  $j$ -го стану (причини);

$a_{ii}$  – умова збереження  $i$ -го стану.

**Розроблення структурної бази даних про авіаційні інциденти.** Відповідно до методології SADT проектування інформаційних систем для розроблення архітектури бази даних доцільно провести попереднє дослідження об'єкта інформатизації, в даному випадку САПІР. Для забезпечення логіки проектування інформаційної системи з метою збереження смислової відповідності предметної області АПІР, подолання труднощів її моделювання за допомогою звичайних (дво-мірних) таблиць, доцільно створення бази даних розпочинати із семантичного (смислового) проектування [6]. Семантичне проектування дозволяє, з одного боку, побудувати схему даних без втрат смислового зв'язку із предметною сферою, а з іншого боку, побудована схема дозволяє легко перейти до схем, виражених на мові конкретної моделі даних і щодо конкретної СУБД. ER-моделювання є одним з можливих способів семантичного проектування баз даних.

Семантичне проектування дозволяє, з одного боку, побудувати схему даних без втрат смислового зв'язку з предметною областю, а з іншого боку, побудована схема дозволяє легко перейти до схем, виражених на мові конкретної моделі даних і щодо конкретної СУБД. ER-моделювання є одним із можливих способів семантичного проектування баз даних.

Розроблення ER-діаграм зазвичай виконуються таким чином. Спочатку наводять діаграму із зазначенням сутностей і зв'язків між ними, не конкретизуючи останні і не вказуючи атрибути сутностей. Така діаграма не зовсім коректна, але дозволяє охопити всю предметну область, що описується. Ця діаграма відповідає створенню загальної або концептуальної моделі бази даних.

Таким чином, використовуючи елементи діаграми Чена [7], було побудовано концептуальну модель бази даних авіаційних інцидентів (рис. 3), де одинарні прямокутники відображають сильні сутності, а подвійні – слабкі сутності. Розширену логічну модель із зазначенням всіх атрибутів та первинних ключів побудовано в середовищі MS Visio (рис. 4).

Зазначені вище концептуальні та логічні моделі дають змогу просто відстежувати смис-

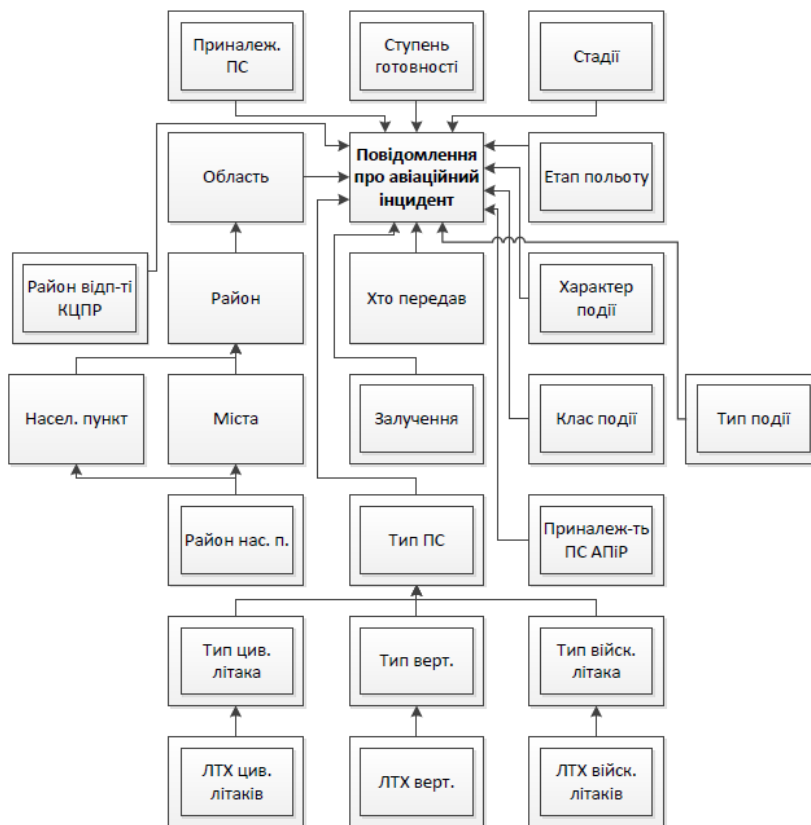


Рис. 3. Концептуальна модель бази даних авіаційних інцидентів

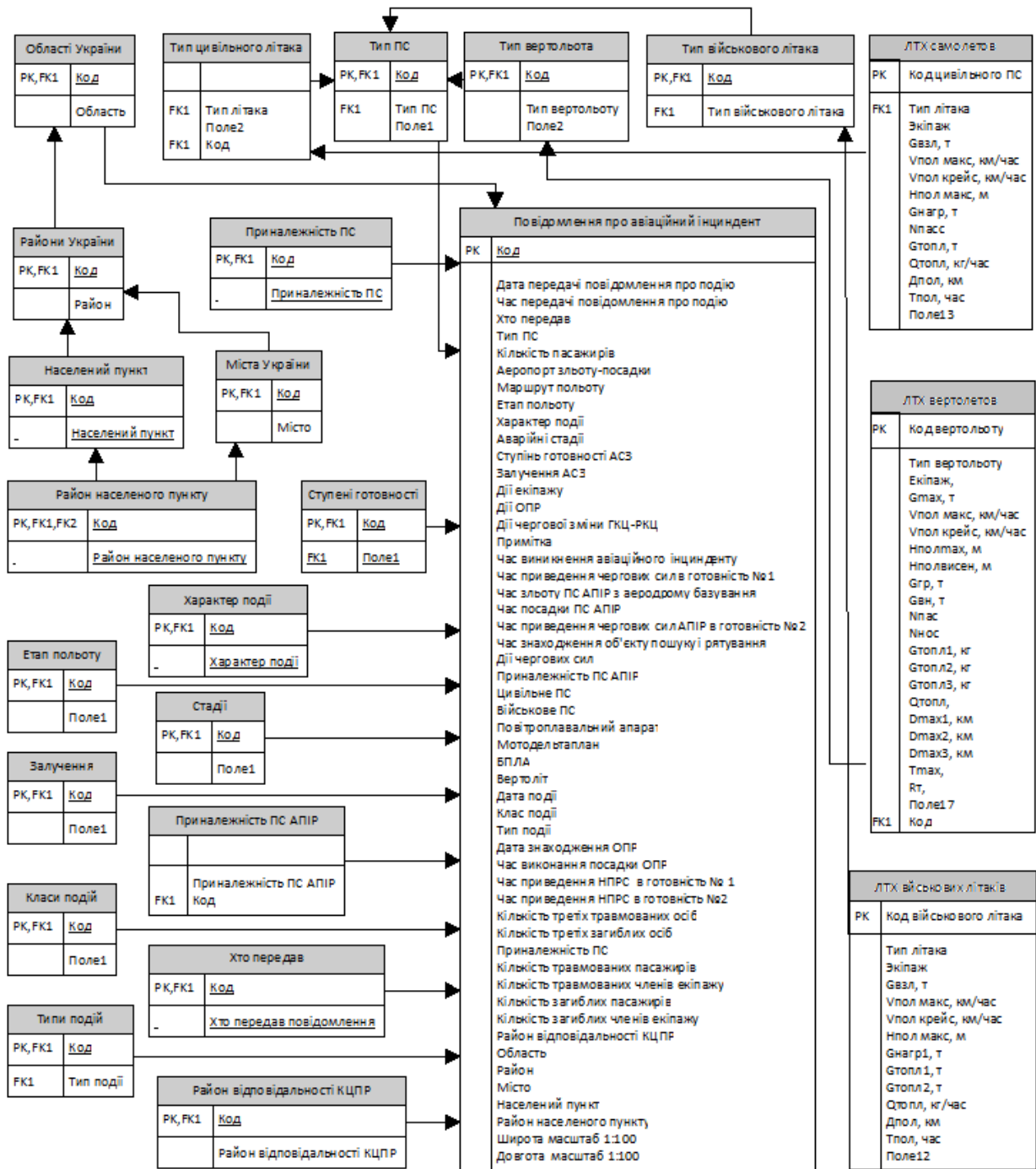


Рис. 4. Логічна модель бази даних про авіаційні інциденти, що побудована в середовищі MS Visio

лові зв'язки між сутностями предметної області, а саме бази даних про авіаційні інциденти, та полегшувати сам процес створення бази даних.

**Розроблення функціональної моделі САПІР із застосуванням методологій IDEF0 та IDEF3.** Завдання функціонального моделювання полягає у представленні системи у вигляді сукупності взаємопов'язаних функцій. Методологічним інструментом функціонального моделювання розглянемо методологію IDEF0, яка включає в себе

метод IDEF0, а також методи і процедури, що його підтримують.

У методі IDEF0 можна виділити такі складники, як концепція методу, графічна мова, процедура читання діаграми, метод побудови моделі, критерії оцінки якості й інші. В організаційну підтримку методу IDEF0 входять: процедура збору даних (інтерв'ювання), метод групової роботи, форми документування моделі, процедури узгодження й затвердження моделі.

Найбільш докладно методологія IDEF0 російською мовою викладається в книзі [8], а стандарт IDEF0 англійською мовою представлений в Internet [9].

Компоненти синтаксису IDEF0-діаграм – функціональні блоки (прямокутники) і дуги (стрілки), правила і діаграми. Функціональні блоки представляють функції, визначені як дії, процеси або перетворення. Дуги представляють дані або об'єкти, пов'язані з функціями. Правила визначають, як компоненти використовуються, а діаграми забезпечують формат для словесного або графічного зображення моделей.

Між даними/об'єктами і функціями можливі чотири відношення: вхід, управління, вихід і механізм. Кожне з цих відношень зображується дугою, пов'язаною з певною стороною блоку (рис. 5): ліва сторона призначена для вхідних дуг (входів), права – для вихідних (виходів), верхня сторона – для управлінських дуг і нижня – для дуг механізмів.

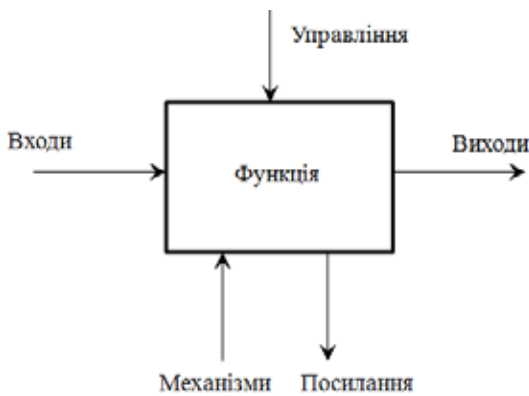


Рис. 5. Загальне зображення функціонального блоку

Розглянемо, контекстну діаграму, що описує процес функціонування системи авіаційного пошуку і рятування в Україні, створену в програмному пакеті ERwin Process Modeler (рис. 6). Вона складається з єдиного загального блоку «Авіаційний пошук і рятування», що відображує відповідну мету і точку зору всієї моделі. У якості вихідних даних (стрілка зліва) поступає інформація або повідомлення про авіаційний інцидент (в телефонному режимі від районного диспетчерського центру (РДЦ), через комп'ютерну мережу КОСПАС/САРСАТ або іншим шляхом). У якості механізму (стрілка знизу) застосовуються сили і засоби Системи авіаційного пошуку і рятування (особовий склад оперативних чергових головного координаційного центру (ГКЦ), Регіонального координаційного центру (РКЦ), РДЦ, рятувальники, повітряні пошуково-рятувальні засоби та ін.). Всі дії з авіаційного пошуку і рятування управляються (стрілка зверху) Правилами АПіР в Україні. В якості вихідних об'єктів (стрілка справа) маємо в найкращому випадку врятованих постраждалих, в найгіршому – тіла загиблих при авіаційному інциденті. Здійснимо декомпозицію цієї «батьківської» контекстної діаграми на дочірні, використовуючи вбудовані функції програми ERwin (рис. 7).

Використовуючи вбудовані інструменти програми ERwin Process Modeler, можна будувати різноманітні діаграми для більшої візуалізації та розуміння функціонування системи АПіР. Приклад деревоподібної діаграми системи АПіР наведено на рис. 8. Також у програмі є можливість розрахунку загального ресурсу на певну операцію. Вводячи кількісні показники (наприклад, часу)

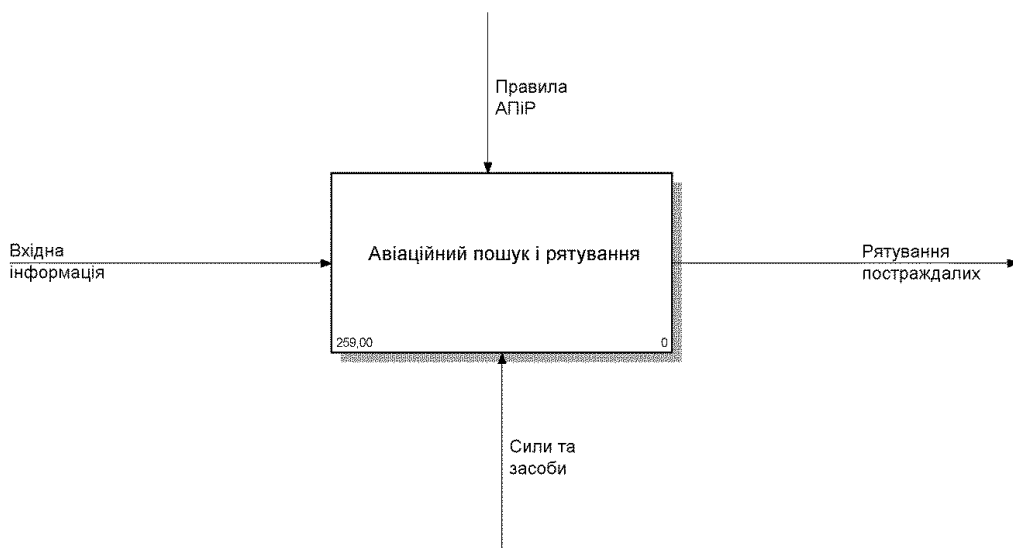


Рис. 6. Бланк контекстної діаграми системи АПіР в Україні (рівень А-0)

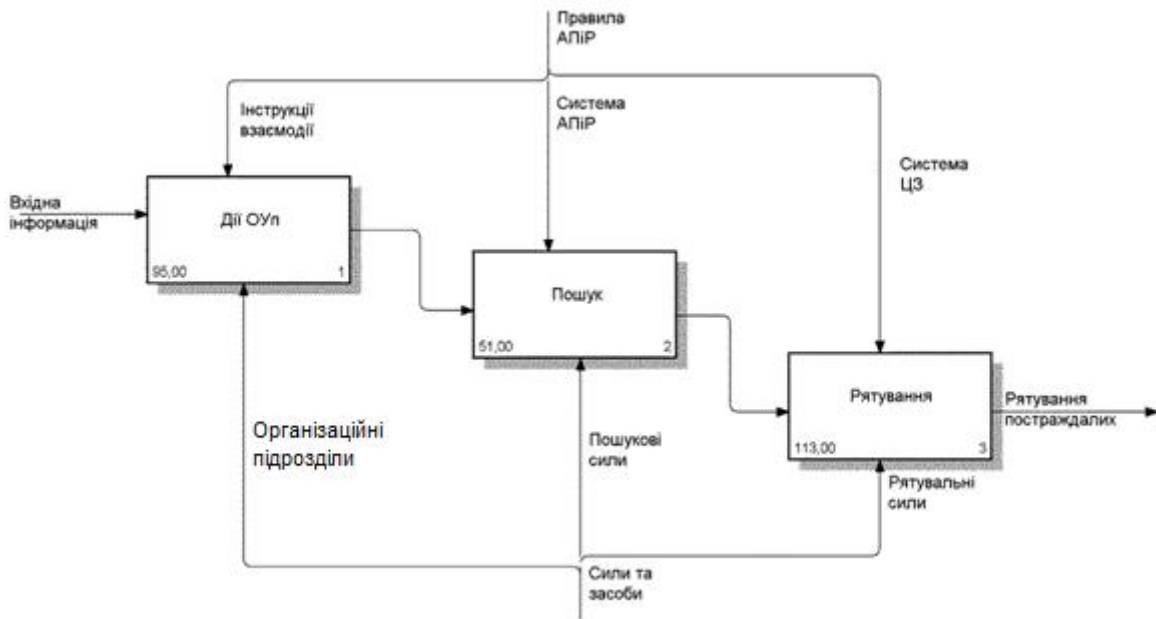


Рис. 7. Декомпозиція (A0) контекстної діаграми САПІР на три підфункції



Рис. 8. Деревоподібна діаграма Системи АПІР

в кожен функціональний блок (відображається в лівому верхньому або нижньому куті), можна отримати загальний витрачений ресурс (у лівому нижньому кутку «батьківського» блоку). Однак

просте підсумування не відображає реальне функціонування системи АПІР, тому наступним кроком роботи є імітаційне моделювання, що дозволить моделювати функціонування САПІР в режимі реального часу із реальними.

**Розроблення еталонної імітаційної моделі системи АПІР в комп'ютерному середовищі Arena Simulation.** Імітаційною моделлю називається спеціальний програмний комплекс, який дозволяє імітувати діяльність деякого складного об'єкта. Він запускає в комп'ютері паралельні взаємодіючі обчислювальні процеси, які є за своїми ресурсно-часовими параметрами (з точністю до масштабів часу і простору) аналогами досліджуваних процесів.

Під імітаційним моделюванням у системі Arena розуміють створення комп'ютерної моделі реальної або передбачуваної системи: фізичної, технологічної, фінансової та проведення на побудованій моделі експериментів з метою опису спостережуваних результатів і прогнозування майбутніх параметрів системи [10].

Імітаційне моделювання в Arena дає змогу перевіряти гіпотези про причини виникнення тих чи інших спостережуваних явищ. При цьому SIMAN дозволяє представляти процеси в різноманітних масштабах часу, виділяти змінні, найбільш важливі для успішного функціонування моделюваної системи, а також аналізувати наявні між ними зв'язки.

Моделювання, написана на SIMAN, включає дві складові частини: MODEL frame і EXPERIMENT frame.



The Model Frame: опис логіки роботи системи за допомогою спеціальних блоків (створення та видалення сутностей, обробки, затримки, маршрутизації).

The Experiment Frame: опис компонентів процесу за допомогою спеціальних елементів (сутностей, ресурсів, черг, атрибутів тощо).

Взаємодія зазначених складових частин у процесі компіляції показана на рис. 9.

Процес моделювання організований таким чином. Спочатку користувач крок за кроком будує у візуальному редакторі системи Arena модель. Потім система генерує по ній відповідний код на SIMAN. Після цього автоматично запускається Cinema Animation.

По завершенні моделювання програма генерує різноманітні звіти, структура даних яких може бути визначена користувачем.

Використовуючи візуальний редактор системи Arena, структурно-функціональна модель дії орга-

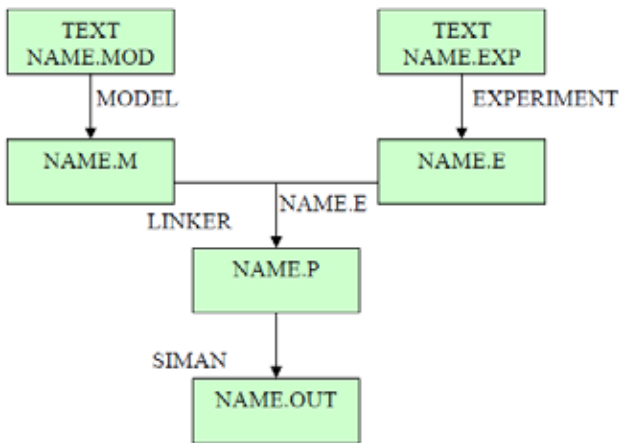


Рис. 9. Процедура виконання компіляції моделі

нів управління САПіР (рис. 8) була перероблена в імітаційну модель Arena (рис. 10).

Використовуючи вихідні дані та функціональні можливості програми Arena, було проведено імітаційне моделювання системи АПіР. Після закінчення процесу моделювання був отриманий звіт, який містить таку статистику.

Графіки та гістограми поточного відпрацювання заявок у деяких функціональних блоках показано на рис. 11. Середні, мінімальні та максимальні витрати часу на дії органів управління вказані на рис. 12. Вони відповідно становлять 27,3; 3,03; 97,7 хв. Тобто дії органів управління триватимуть у середньому півгодини.

**Висновки.** Система авіаційного пошуку і рятування є складною організаційно-технічною системою, що передбачає координовану взаємодію багатьох органів державного підпорядкування та структурних підрозділів самої Держаної служби України з надзвичайних ситуацій.

Розроблена концептуальна та логічна модель бази даних про авіаційні інциденти дає змогу просто відстежувати смислові зв'язки між сутностями предметної області, а саме бази даних про авіаційні інциденти, полегшувати сам процес створення бази даних. Запропонована база даних дозволить вирішувати низку прикладних завдань, зокрема використовуватися для оцінки надійності тих чи інших повітряних засобів, планування оптимального розміщення пошуково-рятувальних повітряних суден ДСНС на території України тощо.

Структурно-функціональна модель системи авіаційного пошуку і рятування, розроблена в програмному середовищі ERwin Process Modeler, що, на відміну від існуючих, більш точно деталізує структуру

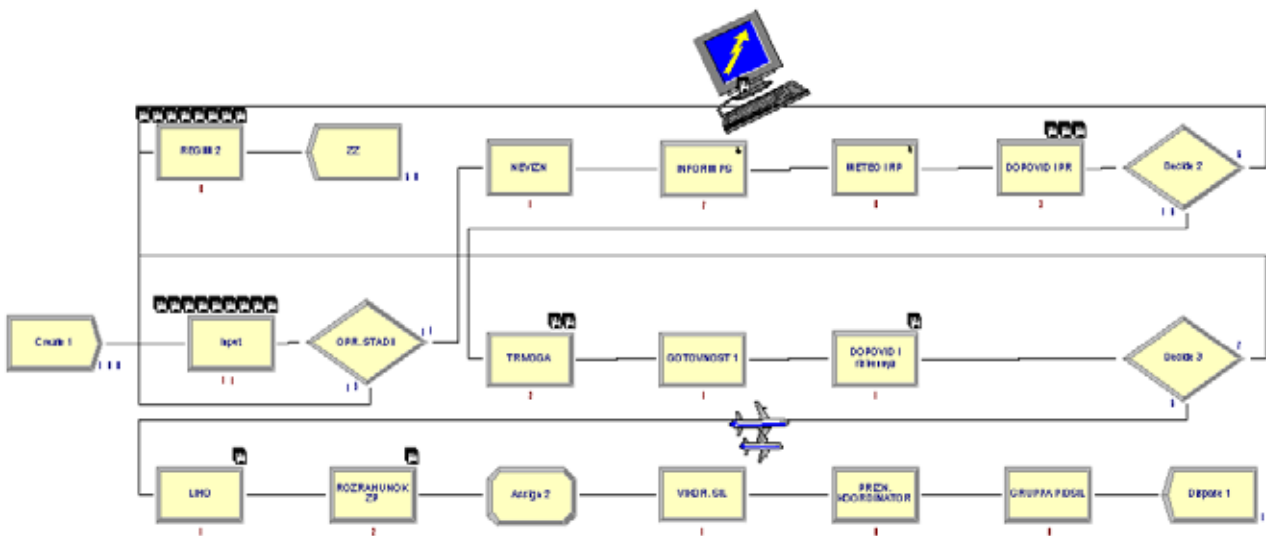


Рис. 10. Створення імітаційної моделі дій органів управління в середовищі Arena Simulation

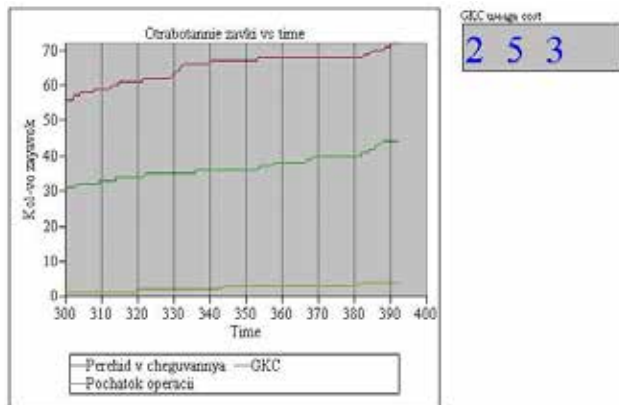


Рис. 11. Графіки поточного відпрацювання заявок у деяких функціональних блоках моделі

Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
VA Time	27.3950	(Insufficient)	3.0229	97.7373
Entity 1				
NVA Time				
Entity 1	0.00	(Insufficient)	0.00	0.00
Wait Time				
Entity 1	188.00	(Insufficient)	0.00	421.55
Transfer Time				
Entity 1	0.00	(Insufficient)	0.00	0.00
Other Time				
Entity 1	0.00	(Insufficient)	0.00	0.00
Total Time				
Entity 1	215.30	(Insufficient)	4.0769	512.55

Рис. 12. Загальні витрати часу на операцію дій органів управління

системи та описує процес функціонування кожного елемента системи авіаційного пошуку і рятування в Україні. Запропонована модель може використовуватися для аналізу ефективності діяльності органів управління, застосування сил та засобів під час проведення пошуково-рятувальних робіт.

Завдяки розробленій імітаційній моделі системи авіаційного пошуку і рятування в програмному середовищі Arena Simulation можна імітувати процес функціонування органів управління в режимі реального часу з реальними характеристиками.

#### Список літератури:

1. Чумаченко С.М., Лисянський В.О., Шабала В.І. Підходи до оцінки інтегральної ефективності системи авіаційного пошуку і рятування *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. Вип. 5. 2013. С. 138–143.
2. Качала В.В. Структурный системный анализ. Часть 1. Функциональное моделирование. Мурманск: МГТУ, 2000. 59 с.
3. Каменнова М. Структурный анализ и реорганизация деятельности предприятия. URL: <http://citforum.ru/ofis/ofis96/103.shtml>. (дата звернення: 24.03.2021)
4. Ивлев В. Попова Т., Огородничук Д. Использование CASE-средств для совершенствования деятельности предприятий *PCWEEK/RE*. 1997. 23 сентября. С. 53–54.
5. Калянов Г.Н. Консалтинг при автоматизации предприятий. М.: СИНТЕГ, 1997. 316 с.
6. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных // 7-е издание. М.: Вильямс, 2001. – 441 с.
7. Пирогов В.Ю. Информационные системы и базы данных: организация и проектирование: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 528 с.
8. Марка Д.А., МакГоуэл К. М. Методология структурного анализа и проектирования SADT. – М.: Метатехнология, 1993. – 240 с.
9. Integration definition for function modeling (IDEF0) – [http://www.idef.com/Complete\\_Reports/idef0/IDEF0\\_TOC.html](http://www.idef.com/Complete_Reports/idef0/IDEF0_TOC.html).
10. Гусева Е.Н. Имитационное моделирование экономических процессов в среде Arena : учебно-методическое пособие / Е.Н. Гусева. 3-е изд., стер. М.: ФЛИНТА, 2016. 132 с. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=83541> (дата звернення: 24.03.2021)

#### Chumachenko S.M., Moshenskyi A.O., Guida O.H., Mushka A.O. DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL-FUNCTIONAL MODEL OF THE AVIATION SEARCH AND RESCUE SYSTEM IN UKRAINE

*The aviation search and rescue system is a complex organizational and technical system that provides for coordinated interaction of many state subordination bodies and structural units of the State Emergency Service of Ukraine and the Ministry of Internal Affairs. Therefore, for a more thorough analysis and successful implementation of proposals to improve the efficiency of the air search and rescue system, this system, as the object of study, must be, above all, adequately described, must be built complete and consistent models – structural and functional and imitation. For this purpose, a database of aviation incidents, an information-logical model and a simulation model were developed.*



*The developed conceptual and logical model of the database on aviation incidents allows to simply trace the semantic connections between the entities of the subject area, namely the database on aviation incidents, to facilitate the process of creating a database. The proposed database will allow to solve a number of applied tasks, in particular to be used to assess the reliability of certain aircraft, to plan the optimal location of search and rescue aircraft of the State Emergency Service of Ukraine on the territory of Ukraine, etc.*

*Structural and functional model of the air search and rescue system, developed in the software environment ERwin Process Modeler, which in contrast to the existing more accurately details the structure of the system and describes the operation of each element of the air search and rescue system in Ukraine. The proposed model can be used to analyze the effectiveness of government agencies, the use of forces and means in conducting search and rescue operations.*

*Thanks to the developed simulation model of the aviation search and rescue system in the Arena Simulation software environment, it is possible to simulate the operation of the controls in real time with real characteristics.*

**Key words:** *aviation search and rescue, aviation search and rescue systems, aviation incident, information-logical model, simulation model.*

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.316.722.1

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/11>

**Сидоренко О.І.**

[orcid.org/0000-0002-3584-4380](https://orcid.org/0000-0002-3584-4380)

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

### СТАБІЛІЗУЮЧИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЯК ОСНОВА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

*Досліджено принципи роботи стабілізуючих перетворювачів напруги з виведенням функціональних схем за трьома основними типами перетворювачів. Підкреслено, що базовими схемами стабілізуючих перетворювачів напруги є понижувальна та підвищувальна схеми. Зазначається, що під час проектування джерел вторинного електроживлення для агрегатів безперебійного живлення й автономних систем електропостачання регулювання (стабілізацію) вихідної напруги необхідно здійснювати в обох вищезазначених зонах. Наведено необхідність застосування принципів стабілізації для систем автономного електропостачання. Доведено, що найбільш перспективним методом регулювання вихідної напруги для широкодіапазонної зміни частоти обертання генератора і споживаної потужності є регулювання напруги в обмотках збудження електрогенератора. Охарактеризовано канали стабілізації вихідної напруги та наголошено, що можна використовувати одночасно два або всі канали, що дає змогу точно змінювати відсоток амплітудної модуляції і стабілізувати вихідні електричні параметри. Наведено три функціональні схеми стабілізації параметрів електричної вихідної напруги з різними видами струму, що надходить на стабілізацію: змінного, постійного та комбінованого. Розкрито складові частини кожної схеми окремо. На основі аналізу роботи функціональних схем зазначено, що відмінність обертання ротора і живильної обмотки асинхронного збудника від автономного інвертора з широтно-імпульсною модуляцією полягає у тому, що електрорушійна сила індукується в обмотці ротора асинхронного збудника. Доведено, що в результаті вилучення вихідної напруги за допомогою ціклоконвертера можна скасувати залежність частоти биття від частоти обертання валу генератора.*

**Ключові слова:** стабілізуючий перетворювач, напруга, електрична енергія, регулювання, джерело живлення, схема, електропостачання.

**Постановка проблеми.** Перетворювачі електричної енергії у своїй фундаментальній основі мають безліч різних класів, перетворювачі постійної напруги належать до одного з них. Розробленню, вдосконаленню та підвищенню ефективності роботи перетворювачів електричної енергії присвячена велика кількість публікацій, значна частина яких стосується перетворювачів постійної напруги, заснованих на базових схемах: понижувальній і підвищувальній [1]. Саме понижувальна і підвищувальна схеми беруться за основу під час вирішення завдань регулювання (стабілізації) вихідної напруги в одній із двох зон, що знаходяться нижче і вище від рівня напруги джерела живлення.

Інколи під час проектування джерел вторинного електроживлення для агрегатів безперебій-

ного живлення й автономних систем електропостачання регулювання (стабілізацію) вихідної напруги необхідно здійснювати в обох вищезазначених зонах. Для цього застосовуються стабілізуючі перетворювачі постійної напруги, які традиційно будуються на основі комбінації з двох згаданих базових типів перетворювачів постійної напруги (комбіновані перетворювачі постійної напруги) або шляхом застосування трансформаторних схем різної складності, включаючи багатоосередкові або дискретні перетворювачі.

Однак через певні недоліки вищезазначених перетворювачів актуальним є завдання побудови стабілізуючого перетворювача з вихідною напругою як вище, так і нижче від рівня напруги джерела живлення, що володіє досить широким діапазоном регулювання і високими динамічними,

статичними, експлуатаційними і технологічними властивостями.

Останнім часом велика увага фахівців перетворювальної техніки приділяється питанням забезпечення стійкості, поліпшення й оптимізації динамічних властивостей перетворювачів постійної напруги. Ці питання вирішуються шляхом удосконалення методів і механізмів управління перетворювачами, що дає змогу отримати додатковий економічний ефект, найчастіше більший, ніж від застосування самого перетворювального пристрою. У зв'язку з цим питання синтезу систем управління, що забезпечують максимальну швидкодію, є надзвичайно актуальним.

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

В умовах сьогодення спектр наукових досягнень у сфері перетворення напруги є значним. Багато як зарубіжних, так і вітчизняних учених підійшли до вивчення питання перетворення напруги, а також її стабілізації.

В.А. Халіков та А.Г. Можаровський [2] розкрили принципи реалізації характеристики «вхід-вихід» дискретного стабілізатора змінної напруги на основі трансформаторно-ключової виконавчої структури. Авторами наведено результати досліджень можливості побудови характеристики «вхід-вихід» дискретного стабілізатора змінної напруги, що має у своєму складі трансформаторно-ключову виконавчу структуру із двохобмотковим вольтододавчим трансформатором. Для двох типових структур доведено, що реалізувати характеристику з незмінними петлями гістерезису в усьому діапазоні зміни вхідних напруг неможливо. Показано, що під час роботи трансформатора в режимі вольтододавання петлі менші, ніж під час вольтовіднімання.

Нові методи побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі дослідив В.І. Яськів [3]. У роботі на основі аналізу наявних методів побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі запропоновано нову топологію таких джерел, яка базується на використанні високочастотних магнітних підсилювачів у ролі силових комутаційних елементів. Зроблено порівняння з існуючими аналогами. Наведено функціональну схему силової частини запропонованого керованого джерела електроживлення та описано принцип її роботи.

У [4] висвітлено засади теорії та методи аналізу й синтезу автоматичних електромеханотронних систем. Наведене дослідження містить широке коло питань із теорії лінійних неперервних та

імпульсних систем автоматичного регулювання. Я.В. Щербак та К.Я. Івакіна розглянули моделювання динамічних ланок і автоматичних систем із перетворювачами електроенергії.

В.В. Божко [5] розробив швидкодіючу систему безконтактного захисту силового устаткування тягової підстанції постійного струму при коротких замиканнях у тяговій мережі, яка завдяки використанню паралельного вузла короткочасного струмообмеження, що підключається і відключається до вольтододавчого перетворювача, дозволяє не тільки обмежувати величину аварійного струму на рівні  $1,2 \div 1,3$  від допустимого робочого струму в номінальному режимі, але у сукупності із використанням регулювання основного дванадцятипульсного випрямляча реалізувати майже бездугове відключення комутаційних апаратів та забезпечити м'якість пускових процесів. Ю.О. Семененко [6] також підійшов до розгляду питання застосування стабілізуючих силових активних фільтрів у сфері електропотягів.

К.К. Победаш та В.А. Святненко [7] розглянули однофазні і трифазні керовані та некеровані випрямлячі, згладжувальні фільтри та стабілізуючі пристрої, імпульсні перетворювачі постійної напруги, автономні інвертори та інвертори, ведені мережею, а також перетворювачі частоти.

Із зарубіжних авторів варто відзначити: Xin Zhang, Xinbo Ruan, and Qing-Chang Zhong [8], Robert, S.B., Philip, T.K. [9], Mohammad Amin, Qing-Chang Zhong [10], K. Jo, J. Kim, D. Kim, C. Jang, and M. Sunwoo [11], Q.-C. Zhong and T. Hornik [12] та інших.

Проте, враховуючи описані наукові набутки за темою, питання дослідження стабілізуючого перетворювача напруги залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Мета статті – розкрити принципи дії стабілізуючого перетворювача напруги.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В умовах сучасного розвитку автономні джерела електроенергії набувають максимальної популярності. Однією з основних цілей створення автономних джерел електроенергії, що складаються з електричної машини і силового напівпровідникового перетворювача для автономних систем електропостачання, є забезпечення споживача електроенергією, параметри якої відповідають стандартам якості [13]. Основними показниками якості автономних джерел електропостачання є параметри вихідної напруги, які визначаються номінальними амплітудою і частотою напруги.

Відхилення напруги живлення, струмів і навантажень – основна причина виходу з ладу дорогого устаткування. Тому стабілізація електричних параметрів перетворювальних джерел як ключового компонента систем автономного електропостачання є актуальним завданням.

Для формування хвилі вихідної напруги за допомогою електрогенератора (ЕГ) найбільш перспективним методом регулювання вихідної напруги для широкодіапазонної зміни частоти обертання генератора і споживаної потужності є регулювання напруги в обмотках збудження електрогенератора [8–10].

У цьому разі перетворювач напруги може мати кілька каналів стабілізації вихідної напруги:

- за допомогою ланцюга обмотки збудження постійного струму;
- за допомогою ланцюга обмотки збудження змінного струму;
- за допомогою схеми циклоконвертера.

Крім того, можна використовувати одночасно два або всі канали, що дає змогу точно змінювати відсоток амплітудної модуляції і стабілізувати вихідні електричні параметри.

Кожен із методів стабілізації вихідних параметрів може застосовуватися для зміни вихідної напруги перетворювача шляхом зміни кута управління напівпровідниковим перетворювачем, який знаходиться в ланцюзі якоря синхронного генератора. Спільне використання цих методів дає змогу підвищити точність управління і розширити діапазон швидкостей ведучого вала для одноканальної системи збудження генератора.

На рис. 1 наведена функціональна схема стабілізуючого перетворювача напруги, в якій вихідну напругу стабілізовано за допомогою ланцюга обмотки збудження постійного струму. Тут електрогенератор (ЕГ) є модуляційним і складається з двох електричних машин, розташованих в одному корпусі синхронного генератора (СГ)

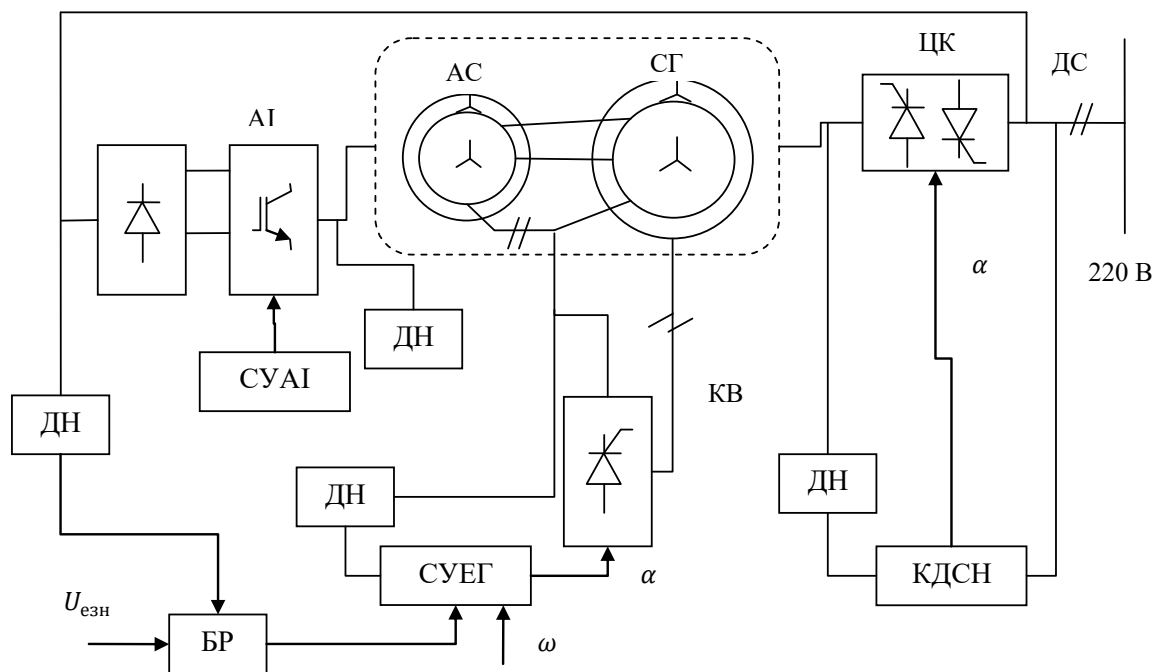


Рис. 1. Функціональна схема системи стабілізації параметрів електричної вихідної напруги за допомогою ланцюга обмотки збудження постійного струму

- $U_{езн}$  – еталонне значення напруги  
 АЗ – асинхронний збудник  
 АІ – автономний інвертор  
 БР – блок обчислення різниць фаз  
 ДН – датчик напруги  
 ДС – датчик струму  
 КВ – керований випрямляч  
 КДСН – кероване джерело струму і напруги  
 СГ – синхронний генератор  
 СУАІ – система управління автономним інвертором  
 СУЕГ – система управління електричним генератором  
 ЦК – циклоконвертер

з додатковою трифазною обмоткою збудження, намотаною на ротор, і без демпферної обмотки, без асинхронного збудника (АЗ). Генератор видає потужність на однофазний циклоконвертер (ЦК). Циклоконвертер має власну систему управління з постійними кутами запалювання ( $\alpha$ ) в режимі випрямляча й інвертора і працює як демодулятор вихідної напруги електрогенератора, а амплітудне значення вихідної напруги стабілізуючого перетворювача визначається електрогенератором, а не кутом запалювання циклоконвертера. Кут включення циклоконвертера формується залежно від сигналів датчика струму (ДС) і датчика напруги (ДН).

Система управління автономним інвертором (СУАІ) із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) в цьому разі має постійний опорний сигнал частоти й амплітуди струму збудження асинхронного збудника, що не залежить від вихідних параметрів перетворювача напруги. Вхідними сигналами системи управління електричного генератора (СУЕГ) виступають швидкість ведучого валу ( $\omega$ ) й опорне значення напруги ( $U_{\text{езн}}$ ) порівняно з поточним значенням амплітуди вихідної напруги (в різницевому блоці (БР)). Регулювання амплітуди вихідної напруги джерела автономного перетворювача здійснюється зміною кута включення керованого випрямляча (КВ), який живить ланцюг обмотки збудження постійного струму електрогенератора.

На рис. 2 наведена функціональна схема перетворювача напруги, в якому вихідна напруга стабілізується за допомогою ланцюга обмотки збудження змінного струму.

Тут вихідна напруга регулюється за допомогою автономного інвертора (АІ), який живить ланцюг статора асинхронного збудника (АЗ). На відміну від попереднього способу, тут у ланцюзі обмотки збудження постійного струму встановлено некерований випрямляч (НВ).

На рис. 3 наведена функціональна схема перетворювача напруги, що являє собою комбінацію розглянутих вище систем стабілізації вихідних електричних параметрів.

В обмотці якоря синхронного генератора ЕРС наводиться від обмотки збудження постійного струму. Обмотка збудження синхронного генератора через керований випрямляч є навантаженням для асинхронного збудника. Додатково трифазна обмотка збудження синхронного генератора намотана на ротор, що також є навантаженням для асинхронного збудника. Сума двох ЕРС, наведених в обмотці якоря синхронного генератора, дорівнює результуючій ЕРС, амплітуда якої змінюється з частотою биття. У результаті вилучення вихідної напруги за допомогою циклоконвертера можна отримати незалежність частоти биття від частоти обертання валу генератора. Але тут необхідно, щоб кількість пар полюсів обмоток синхронного генератора була рівною сумі кількості

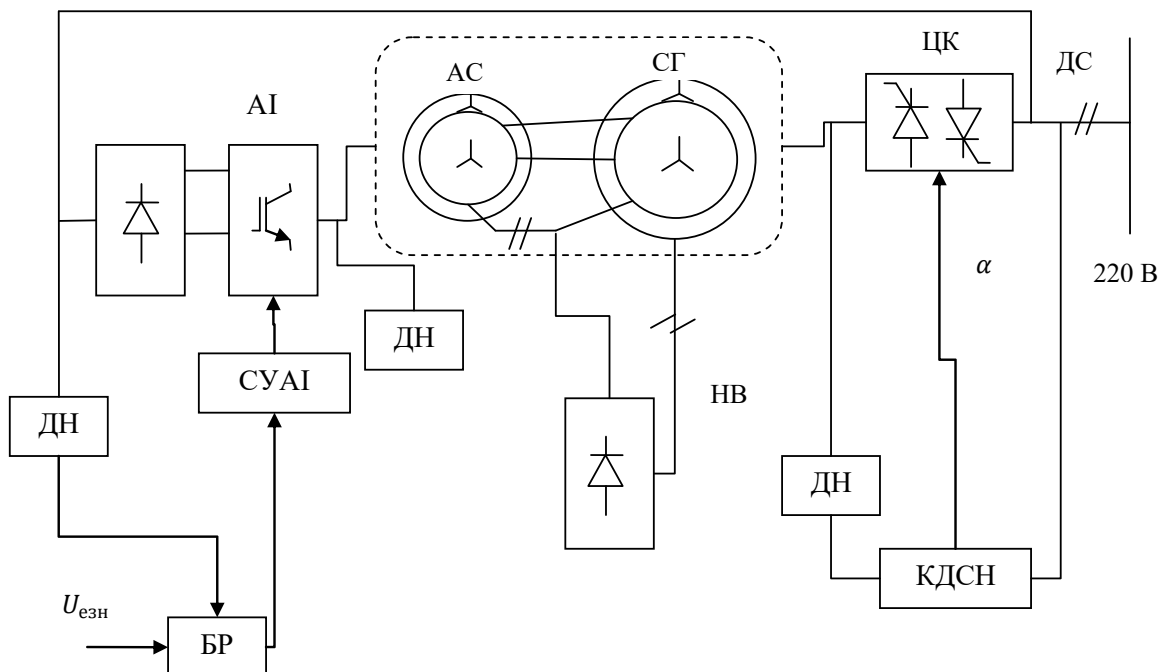


Рис. 2. Функціональна схема системи стабілізації параметрів електричної вихідної напруги за допомогою ланцюга обмотки збудження змінного струму

НВ – некерований випрямляч

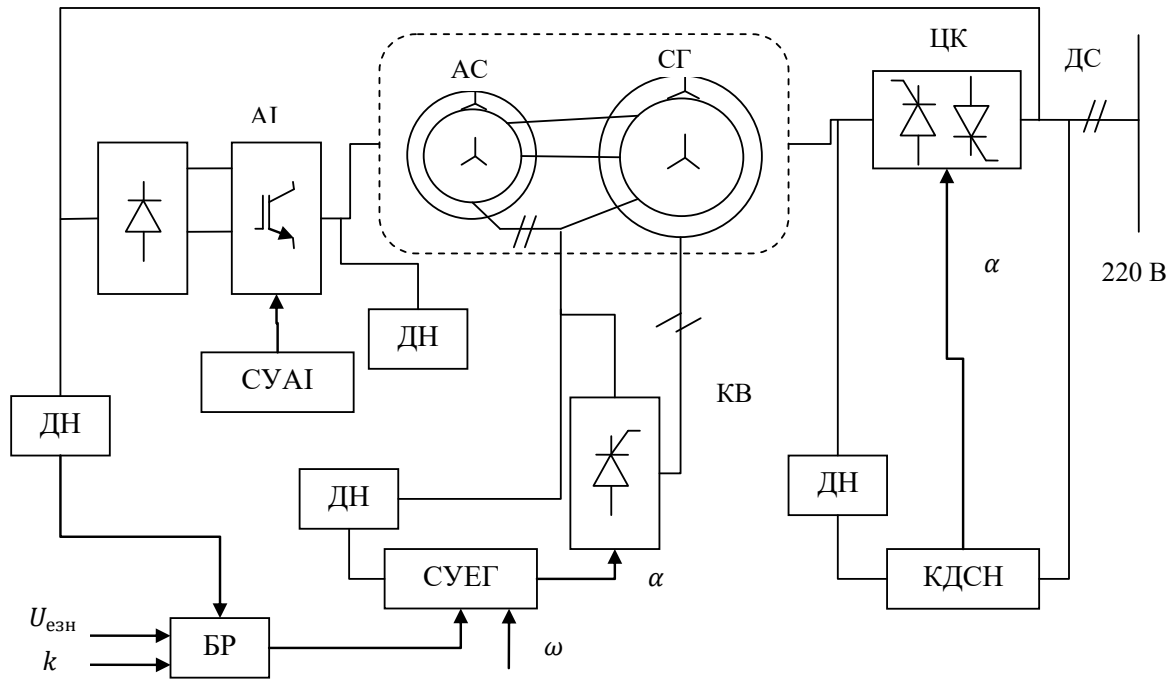


Рис. 3. Функціональна схема системи стабілізації параметрів електричної вихідної напруги комбінованого типу

пар полюсів обмоток асинхронного збудника і додаткової трифазної обмотки збудження синхронного генератора.

**Висновки.** У роботі досліджено принципи роботи стабілізуючих перетворювачів напруги з виведенням функціональних схем за трьома основними типами перетворювачів. Стабілізуючі перетворювачі напруги, побудовані за наведеними вище функціональними схемами (на рис. 1, 2, 3),

дають змогу виводити трифазну систему модульованої напруги. Виділення моделюючої функції за допомогою циклоконвертера дає змогу отримати як вихідну напругу перетворювача однофазну напругу, близьку за формою до синусоїдальної хвилі. У цьому разі частота вихідної напруги буде дорівнювати половині частоти змінного струму збудження і не залежати від частоти обертання генератора.

#### Список літератури:

1. Аналогова схемотехніка. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 177 с.
2. Халіков В.А., Можаровський А.Г. Реалізація характеристики вхід-вихід дискретного стабілізатора змінної напруги на основі трансформаторно-ключової виконавчої структури. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. 31. С. 106–111.
3. Яськів В.І. Нові методи побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. № 4. С. 92–96.
4. Щербак Я.В., Івакіна К.Я. Основи теорії автоматичного регулювання електромеханотронних систем: навч. посібник. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2019. 222 с.
5. Божко В.В. Стабілізуючі перетворювальні агрегати вольтододадового типу підвищеної ефективності для тягового електропостачання постійного струму електрифікованих залізниць: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / В.о. Нац. техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут». Харків: [б.в.], 2011. 21 с.
6. Стабілізуючі силові активні фільтри для підвищення ефективності тягового електропостачання постійного струму: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. Харків, 2017. 20 с.
7. Побєдаш К.К., Святненко В.А. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 244 с.
8. Wang, Y., Ren, B., & Zhong, Q.C. Bounded UDE-based controller for input constrained systems with uncertainties and disturbances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. No. 68(2). P. 1560–1570.
9. Robert, S.B., Philip, T.K. *IEEE Transactions on Power Electronics* 28, 2013. P. 537–546.

10. Amin M., & Zhong, Q.C. Resynchronization of distributed generation based on the universal droop controller for seamless transfer between operation modes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019. No. 67(9). P. 7574–7582.
11. Jo K., Kim J., Kim D., Jang C., & Sunwoo, M. Development of autonomous car–Part II: A case study on the implementation of an autonomous driving system based on distributed architecture. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. No. 62(8). P. 5119–5132.
12. Zhong Q.-C., Hornik T. *Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration*. Piscataway, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2013.
13. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

### **Sydorenko O.I. STABILIZING CONVERTER AS THE BASIS OF THE SYSTEM OF STABILIZATION OF ELECTRIC OUTPUT VOLTAGE PARAMETERS**

*The principles of operation of stabilizing voltage converters with derivation of functional circuits by three main types of converters are investigated. It is emphasized that the basic circuits of stabilizing voltage converters are step-down and step-up circuits. It is noted that when designing secondary power supplies for uninterruptible power supplies and autonomous power supply systems, regulation (stabilization) of the output voltage must be carried out in both of the above zones. The necessity of application of stabilization principles for autonomous power supply systems is given. It is proved that the most promising method of output voltage control for wide-range change of generator speed and power consumption is voltage regulation in the excitation windings of the generator. Output voltage stabilization channels are characterized and it is emphasized that it is possible to use two or all channels simultaneously, which allows to accurately change the percentage of amplitude modulation and stabilize the output electrical parameters. Three functional schemes of stabilization of parameters of electric output voltage with different types of current coming on stabilization are given: alternating, direct and combined. The components of each scheme are disclosed separately. Based on the analysis of functional circuits, it is noted that the difference between the rotation of the rotor and the supply winding of the asynchronous exciter from the autonomous inverter with pulse-width modulation is that the electromotive force is induced in the rotor winding of the asynchronous exciter. It is proved that as a result of extraction of output voltage by means of the cycloconverter it is possible to cancel dependence of frequency of beating on frequency of rotation of a shaft of the generator.*

**Key words:** stabilizing converter; voltage, electricity, regulation, power supply, circuit, power supply.

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.75

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/12>

**Бунке О.С.**

[orcid.org/0000-0002-7945-7040](https://orcid.org/0000-0002-7945-7040)

Scopus Author ID: 54954489000

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Новіков П.В.**

[orcid.org/0000-0002-2790-5809](https://orcid.org/0000-0002-2790-5809)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### МЕТОДИКА ОПТИМІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ ЗБОРУ ДАНИХ МЕРЕЖЕВИМИ ВУЗЛАМИ СИСТЕМИ ІОТ

*Розглянуто ключові фактори, що стримують активне впровадження парадигми «Інтернету речей» як набору концепцій зі створення єдиної мережевої структури, що складається із електронних пристроїв, які на базі стандартизованих протоколів зв'язку у автоматичному режимі здійснюють обмін даними через центри координації. Показані обмеження пов'язані з неможливістю рівномірного покриття поверхні планети наземними вузлами інформаційних мереж, що своєю чергою вказує на пріоритет розвитку апаратно-програмних комплексів у рамках інфраструктури супутникового «Інтернету речей».*

*Проведена систематизація типових задач, характерних для побудови апаратно-програмної бази супутникового Інтернету речей, зокрема, сучасні тенденції, пов'язані з розробкою алгоритмів збору даних. Узагальнено схему організації супутникових розподілених інформаційних систем та вказано на можливість її оптимізації шляхом впровадження наземних центрів обробки даних. Розроблено базову математичну модель інфраструктури наземних станцій збору та обробки даних, що функціонує у рамках концепції «Інтернету речей». Запропонована методика включає у себе впровадження супутникової розподіленої інформаційної системи, програмна платформа якої базується на застосуванні алгоритмів відновлення масивів дискретних даних, а також методів просторово-часового компресійного зондування. На рівні математичного моделювання показано можливість відповідно зазначеного підходу зменшити вимоги до пропусковості інформаційного каналу шляхом обмеження інформаційного обсягу даних, які підлягають збору, завдяки застосуванню процедури вибіркового збору і реконструкції частини елементів масиву даних. Запропонована архітектура апаратно-програмної платформи інформаційного вузла супутникового «Інтернету речей», таким чином, складається з функціональних блоків кластеризації вхідних даних, отримання базової вибірки даних і відновлення даних. Вдосконалення математичної моделі при цьому включає у себе застосування як цільової функції показників стиснення вхідних даних, що дозволяє звести задачу оптимізації до математичної задачі пошуку екстремумів цільових функцій.*

**Ключові слова:** супутниковий «Інтернет речей», розподілена інформаційна система, пропусковість інформаційного каналу, відновлення дискретних даних, кластеризація даних, просторово-часове компресійне зондування, цільова функція.

**Постановка проблеми.** Впровадження парадигми «Інтернету речей» (Internet of Things, IoT) пов'язана з розширенням бази електронних пристроїв, а також рівня їх функціональності відповідно до обчислювального ресурсу та ефективності систем реєстрації, обробки, прийому і передачі

даних. Відповідно до концепцій, на основі яких будується парадигма IoT, організація ефективної інфраструктури має базуватися на дотриманні рівномірного розподілу центрів наземних інформаційних мереж (Terrestrial Networks, TNs) відповідно до рівня запитів користувачів, що у ряді



випадків унеможлиблюється географічними умовами зон покриття, нерентабельністю покриття з економічної точки зору, природними і техногенними катастрофами, а також веденням військових дій. Таким чином, на сьогоднішній день у галузі IoT існує широкий клас задач, що можуть бути вирішені лише на рівні впровадження концепції супутникового «Інтернету речей» (Satellitebased Internet of Things, SB-IoT) через розширення супутникових інформаційних мереж, оновлення апаратної бази та оптимізацію програмних алгоритмів. При цьому слід зазначити, що масштабування супутникових мереж є технологічно складним процесом, що характеризується надзвичайно високим кошторисом. Відповідно до цього значним чином актуалізується завдання розробки програмних алгоритмів та математичних процедур, що лежать у їх основі, які можуть бути використані для збільшення показників стиснення масивів даних за мінімізації втрат.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** у галузі SB-IoT базувався на визначенні типових запитів та тенденцій, характерних для супутникових інформаційних мереж [1–3]. Особливу увагу було приділено організації розподілених інформаційних мереж (Distributed Information Networks, DIS) та актуальним алгоритмам збору даних сенсорних мереж інфраструктури TNs, що базуються на зменшенні об'ємів масивів даних, які передаються у рамках сервісів SB-IoT [4–7]. Було вказано на пріоритет алгоритмів модельного подання (Model-Based Algorithms, MBA), що базуються на математичному апараті визначення параметру подібності елементів вибірки [5], алгоритмів розпізнавання зі стисненням (compressed-sensing based algorithms, CSA), що надають можливість реконструкції даних, представлених у вигляді сигналів великої розмірності [6], та алгоритмів з доставкою запиту (Query-Driven Algorithms, QDA), що скорочують час обробки великих масивів даних [7]. Було показано, що обмеження на застосування MBA- та CSA-підходів пов'язані з високим навантаженням на обчислювальний ресурс апаратно-програмного комплексу. Своєю чергою QDA-орієнтований підхід показує свою ефективність лише по відношенню до вузького класу задач, у рамках яких є можливість з високою точністю класифікувати запити на автоматичному рівні. Таким чином, проведений аналіз вказав на невирішену частину загальної проблеми організації програмної платформи супутникових інформаційних мереж, внаслідок чого було запропоновано застосувати у сфері SB-IoT математичних методів

відновлення дискретних даних [8] та просторово-часового компресійного зондування [9].

**Постановка завдання.** Розробці алгоритмів оптимізації процедур обробки і передачі даних у рамках SB-IoT має передувати узагальнення проблематики організації супутникових мережових структур та систематизація поставленого завдання.

Як показано на діаграмі (рис. 1), особливість налаштування інфраструктура IoT полягає у постійному рості робочих станцій, що обслуговуються відповідним сервісом (окремих терміналів, сенсорних мереж, локальних мереж, глобальної мережі Інтернет), та розширенні функціональних можливостей системи (на сьогоднішній день вона слугує не тільки для прийому та передачі даних з координуванням інформаційних потоків, але також здійснює попередню обробку і систематизацію інформаційних блоків). Завдяки цьому парадигма IoT на сьогоднішній день значно розширилась [10; 11], виділився окремий напрям регулювання транспортних потоків «Інтернет транспортних засобів» (Internet of Vehicles, IoV), що разом може бути описано у рамках парадигми «Інтернету всього» (Internet of Everything). При цьому слід зазначити технічну складність і високий кошторис масштабування інфраструктури SB-IoT (рис. 1).

У цьому разі збільшення кількості інформаційних вузлів пов'язано з запуском додаткових супутникових систем, а врахування експоненційного росту вимог на перепускність інформаційних каналів і обчислювального ресурсу системи значною мірою збільшує вагу серверних блоків і мережевого обладнання, що має бути виведено на орбіту і у ряді випадків робить проєкт недоцільним з економічної точки зору.

На сьогоднішній день типовим підходом є застосування додаткових наземних центрів систематизації та остаточної обробки масивів даних, що передають підготовлені інформаційні блоки у супутникову мережу. Слід зазначити, що під час математичного моделювання системи SB-IoT і розробки методології алгоритмів оптимізації передачі даних необхідно врахувати відповідні компоненти апаратно-програмного комплексу (рис. 2).

Таким чином, **метою дослідження** є побудова математичної моделі функціонування апаратно-програмного комплексу SB-IoT, що включає у себе як мережу супутників, так і наземні станції, а також формування на її основі методологічної бази для розробки алгоритмів оптимізації процесів

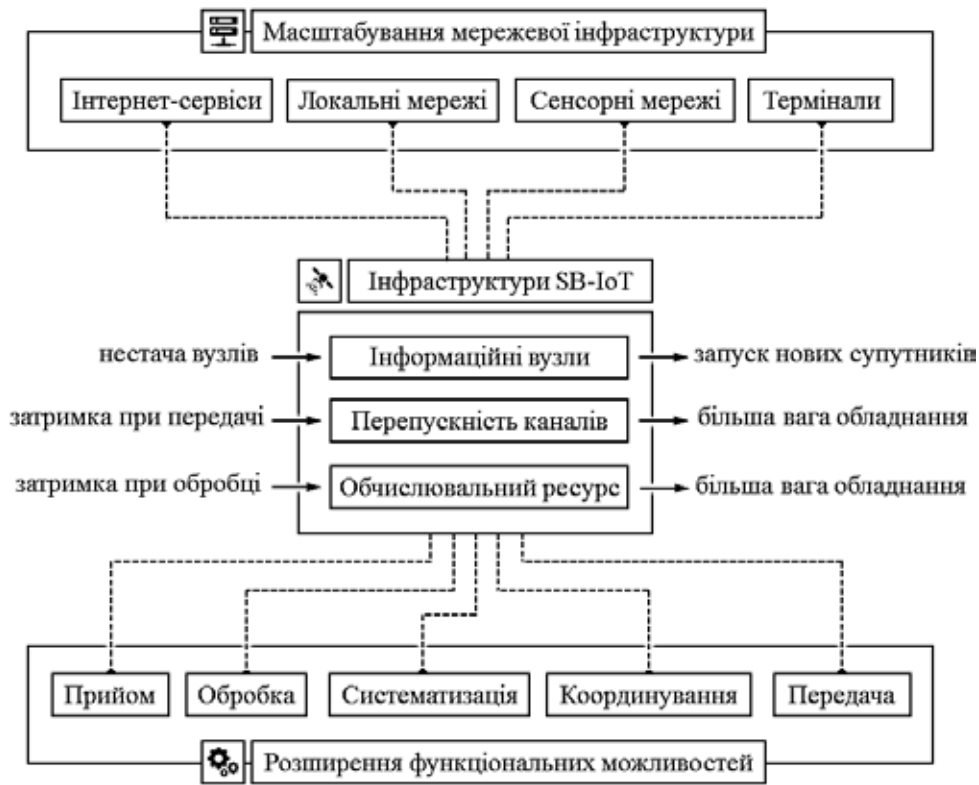


Рис. 1. Діаграма росту вимог до інфраструктури SB-IoT відповідно масштабування мережевих сервісів та розширення їх функціональних можливостей

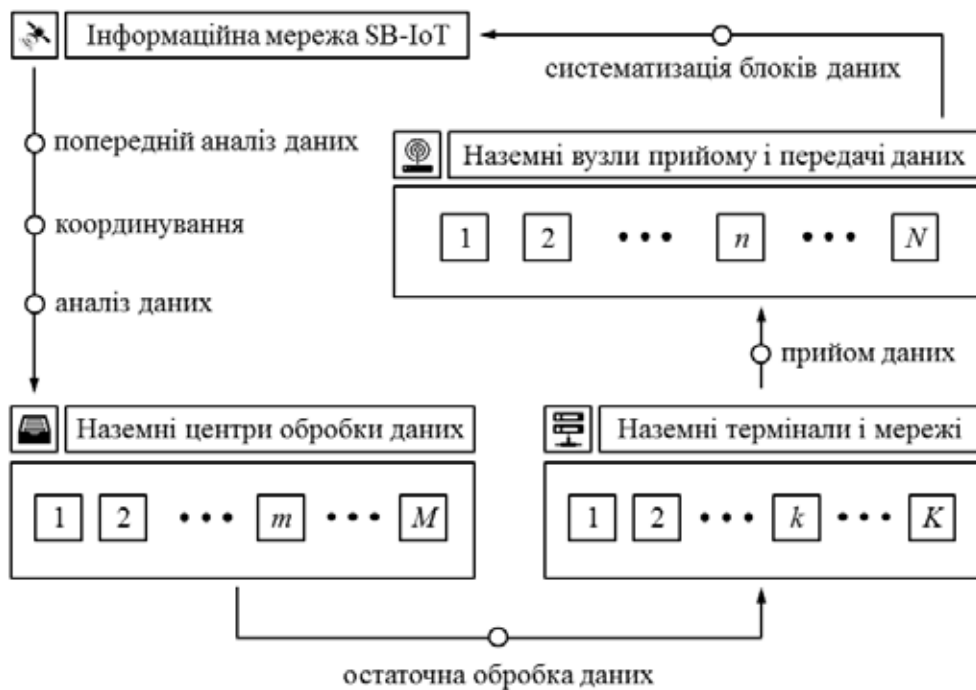


Рис. 2. Узагальнена схема організації інфраструктури SB-IoT наземними центрами обробки, прийому і передачі даних

передачі даних у середовищі супутникових мереж та розробка системи оцінки їх ефективності.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо математичну модель прийому і передачі даних

комплексом комунікаційних вузлів  $n \in [1; N]$  наземної підсистеми SB-IoT, що відбувається протягом часового інтервалу  $t \in [T_-; T_+]$ . Дискретизуємо множину операцій прийому і передачі даних

через введення мінімального часового інтервалу  $T_0$ . Таким чином, множина операцій прийому і передачі даних може бути виражена через одно-мірну матрицю  $\mathbf{T}$ , кожному елементу якої  $\Delta t_i$  відповідає матриця блоку даних, що передаються  $\mathbf{D}_i$ , як складник загального блоку матриці даних  $\mathbf{D}:\{\mathbf{D}_i\}$ , що передаються протягом повного часового інтервалу  $[T_-; T_+]$ :

$$\mathbf{T}:\{\Delta t_i\}, \text{де } \begin{cases} i \in [1; I], \text{де } I = \frac{T_+ - T_-}{T_0} \\ \left[ \begin{array}{l} \Delta t_i \in [T_-; T_+] \text{ для } \forall i \\ \Delta t_i = T_- + i \cdot T_0 \end{array} \right. \end{cases} \quad (1)$$

Застосування алгоритмів відновлення дискретних даних (ВДА) у рамках розробки методик оптимізації роботи SB-ІоТ шляхом зніснення навантаження на інфраструктуру мережевих каналів включає у себе застосування процедури вибіркового збору даних на етапі підготовки даних наземними станціями та процедури реконструкції даних на етапі обробки даних на інформаційному вузлі супутникової мережі. Нехай кількість наземних вузлів, що приймають і передають дані протягом інтервалу  $\Delta t_i$ , складає  $N_i \in [1; N]$ , а об'єм даних, що підлягає відновленню для окремого вузла  $n$ , складає  $D_{i,n}^\Delta$ , тоді як загальний об'єм даних для цього вузла складає  $D_{i,n}^\Sigma$ . Відповідно, кожен наземний вузол  $n$  у часовий інтервал  $\Delta t_i$  передає об'єм даних  $D_{i,n} = D_{i,n}^\Sigma - D_{i,n}^\Delta$ .

Чисельні показники, що характеризуватимуть ефективність методу, що базується на ВДА-алгоритмах, можна виразити через цільові функції рівня стиснення даних відповідно зменшення кількості вузлів наземних станцій, що застосовуються під час передачі даних (показник  $\eta_N$ ), та зменшення об'єму даних, що передаються (показник  $\eta_D$ ):

$$\left[ \begin{array}{l} \eta_N = \frac{N - N_i}{N} \cdot 100\% \text{ для } \begin{cases} N > 0 \\ N_i \in [1; N] \end{cases} \\ \eta_D = \left( 1 - \frac{\sum_{n=1}^N \left( \frac{D_{i,n}^\Sigma - D_{i,n}^\Delta}{D_{i,n}^\Sigma} \right) \right) \cdot 100\% \text{ для } D_{i,n}^\Sigma > 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

Пошук глобальних максимумів  $\max(\eta_N)$  і  $\max(\eta_D)$  надає можливість на математичному рівні вирішити задачу оптимізації ВДА-алгоритму під час їх застосування у апаратно-програмному середовищі SB-ІоТ. На рис. 3 представлено загальну схему роботи інформаційного вузла

супутникової мережі SB-ІоТ, що працює на основі даних, які надходять від наземних інформаційних вузлів прийому і передачі даних.

Представлена схема функціонування інфраструктури SB-ІоТ, таким чином, включає у себе наступні етапи:

- отримання інформаційним вузлом супутникової мережі SB-ІоТ набору вхідних даних;
- проведення кластеризації і систематизації набору на основі вибірки з високим рівнем просторової кореляції, що сформована на попередніх етапах прийому-передачі даних від сенсорних мереж наземного комплексу SB-ІоТ;
- формування для кожного кластера нової вибірки відповідно поточного набору даних наземних вузлів сенсорної мережі;
- відновлення даних для кожного кластера на основі часової і просторової кореляції між компонентами отриманої вибірки відповідно оптимізованого ВДА-алгоритму;
- передача вибірки з відновленими даними у базу для застосування на наступних етапах кластеризації, отримання вибірки і відновлення даних на основі ВДА-алгоритму.

При цьому оптимізація схеми проводиться на рівні наземних станцій та аналізу математичної моделі, аби не збільшувати навантаження на обчислювальний ресурс інформаційних вузлів супутникової мережі.

**Висновки.** Таким чином, у результаті проведеного дослідження було розглянуто тенденції впровадження парадигми «Інтернету речей» та, зокрема, її реалізації на базі супутникової мережі. Показано, що актуальність супутникового «Інтернету речей» пов'язана з неможливістю рівномірного покриття поверхні планети наземними інформаційними вузлами, але, тим не менш, мережі супутникового «Інтернету речей» також мають частково базуватись на наземних станціях прийому, передачі і обробки даних. Для цього було узагальнено схему організації та оптимізації супутникових розподілених інформаційних систем та розроблено базову математичну модель інфраструктури наземних станцій. Була запропонована методика впровадження супутникової розподіленої інформаційної системи, програмна платформа якої базується на застосуванні алгоритмів відновлення масивів дискретних даних. Показано можливість відповідно до зазначеного підходу зменшити вимоги до показника перепускності інформаційного каналу шляхом обмеження інформаційного обсягу даних, які підлягають збору завдяки застосуванню процедури

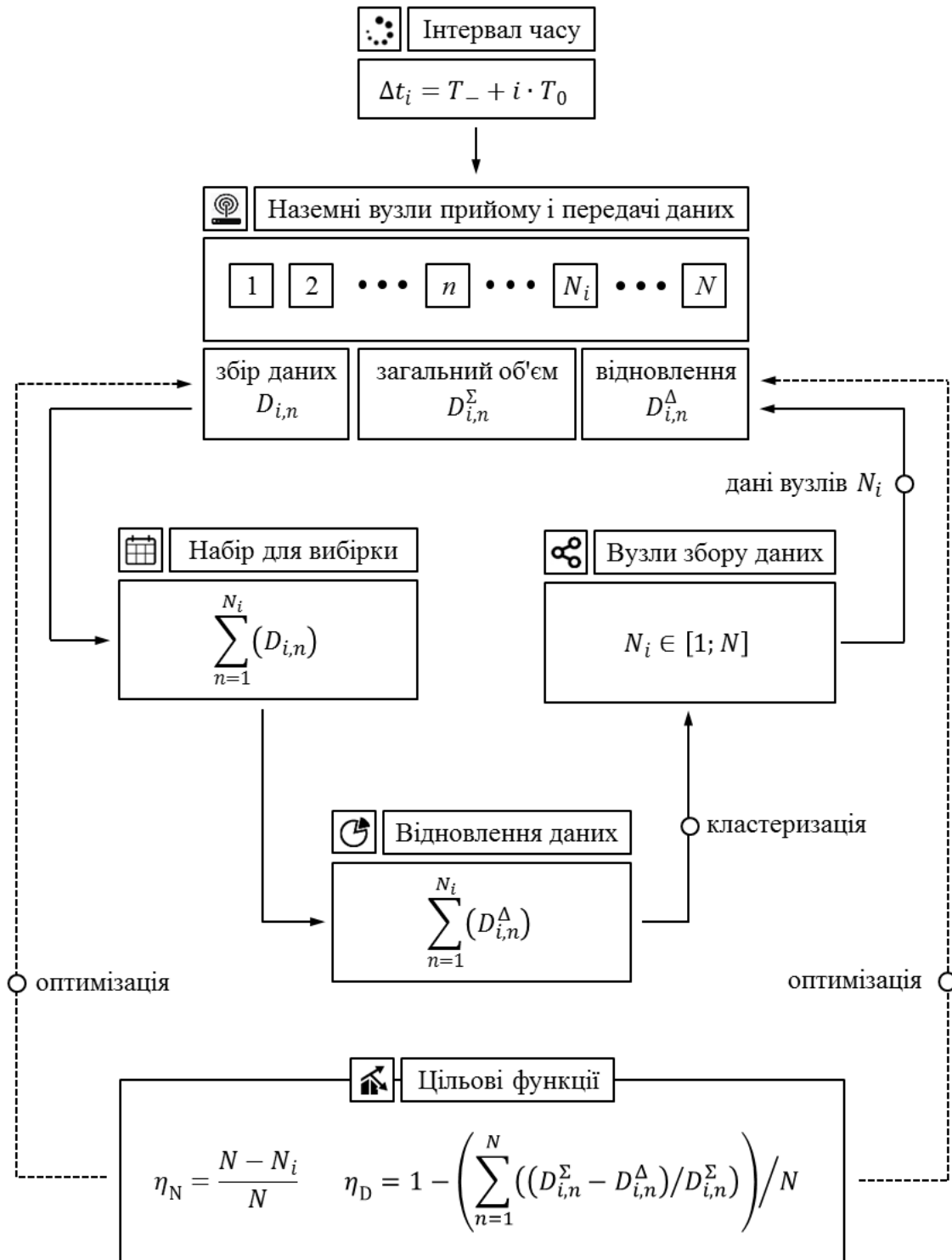


Рис. 3. Схема роботи та оптимізації інформаційного вузла SB IoT з наземними вузлами прийому та передачі даних

вибіркового збору і реконструкції частини елементів масиву даних. Запропонована в результаті дослідження архітектура апаратно-програмної платформи інформаційного вузла системи супутникового «Інтернету речей» складається з функціональних блоків кластеризації вхідних даних, отримання вибірки даних і відновлення даних.

Розроблена математична модель надає можливість проведення оптимізації і налаштування апаратно-програмної платформи SB-IoT через розрахунок цільових функцій рівня стиснення даних, шляхом зведення задачі оптимізації до математичної задачі пошуку максимумів відповідних цільових функцій.

**Список літератури:**

1. Wei J., Cao S. Application of Edge Intelligent Computing in Satellite Internet of Things. *IEEE International Conference on Smart Internet of Things (Smart IoT)*. 2019. P. 52–58.
2. Aiyetoro T., Owolawi A. Spectrum Management Schemes for Internet of Remote Things (IoRT) Devices in 5G Networks via GEO Satellite. *Future Internet*. 2014. No.11(12). P. 257–266.
3. Soua R., Palattella M.R., Engel T. IoT Application Protocols Optimization for Future Integrated M2M-Satellite Networks. 2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), 2018. P. 22-32.
4. Gedik B., Liu L., Yu P.S. ASAP: an adaptive sampling approach to data collection in sensor networks. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2007. No. 18 (12). P. 1766–1783.
5. Nguyen M.T., Teague K.A. Compressive sensing based random walk routing in wireless sensor networks. *Ad Hoc Netw.* 2017. No.54. P. 99–110.
6. Rajesh G., Chaturvedi A. Correlation analysis and statistical characterization of heterogeneous sensor data in environmental sensor networks. *Computer Networks*. 2019. Vol. 164. P. 106902–106911.
7. Zhou X., Ling H. Zero-effort projection for sensory data reconstruction in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2016. No. 12 (8). P. 1550–1563.
8. Kong L., Xia M., Liu X.Y., Wu M.Y., Liu X. Data loss and reconstruction in sensor networks. *2013 Proceedings IEEE INFOCOM*. IEEE Press, Piscataway. 2013. P. 1654–1662.
9. Vijayaraghavan V., RianLeevinson J. Intelligent traffic management systems for next Generation IoV in smart City Scenario. *Connected Vehicles in the Internet of Things*. 2020. P. 123–141.
10. Sachdev R. Towards security and privacy for Edge AI in IoT/IOE based digital Marketing Environments. *2020 Fifth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*. 2020. P. 98–109.

**Bunke O.S., Novikov P.V. METHOD OF OPTIMIZATION OF DATA COLLECTION ALGORITHMS FOR NETWORK NODES OF THE IOT SYSTEM**

*There were analyzed key factors that hinder the active implementation of the Internet of Things paradigm as a set of concepts for creating a single network structure consisting of electronic devices, which on the basis of standardized communication protocols automatically exchange data through coordination centers. Mentioned limitations are related to the impossibility of uniform coverage of the planet's surface by terrestrial nodes of information networks, which, in turn, indicates the priority of development of hardware and software systems within the infrastructure of the Space-based Internet of Things. The systematization of typical tasks typical for the construction of the hardware and software base of the satellite Internet of Things, in particular, current trends related to the development of data collection algorithms. The scheme of organization of satellite distributed information systems is generalized and the possibility of its optimization by introduction of terrestrial data processing centers is indicated. A basic mathematical model of the infrastructure of ground stations for data collection and processing has been developed, which operates within the framework of the Internet of Things concept. The proposed technique includes the introduction of a satellite distributed information system, the software platform of which is based on the application of algorithms of sampling-reconstruction, as well as methods of spatio-temporal compressive sensing. At the level of mathematical modeling, it is possible to reduce the bandwidth requirements of the information channel by limiting the information volume of data to be collected by applying the procedure of selective collection and reconstruction of some elements of the data array. The proposed architecture of the hardware-software platform of the information node of the Space-based Internet of Things, thus, consists of functional blocks of clustering of input data, obtaining a basic data sample and data recovery. The improvement of the mathematical model includes the use of objective data compression indicators as objective functions, which allows to reduce the optimization problem to the mathematical problem of finding the extrema of the objective functions.*

**Key words:** *Space-based Internet of Things, distributed information system, information channel capacity, sampling-reconstruction, data clustering, spatio-temporal compressive sensing, target function.*

**Бунь В.П.**

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

**Баган Т.Г.**

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

## **ВИБІР ВИЗНАЧАЛЬНИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПАРОПЕРЕГРІВАЧА ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛОАГРЕГАТУ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ ТЕОРІЇ КАТАСТРОФ**

*У статті досліджені термодинамічні процеси, які проходять в пароперегрівачі прямооточного котлоагрегату.*

*Для вдосконалення якості функціонування автоматичної системи діагностики запропоновано розглядати термодинамічні процеси, які проходять в пароперегрівачі, з точки зору теорії катастроф.*

*Запропоновано підхід для вибору визначальних діагностичних параметрів, які необхідні для побудови адекватних аналітичних діагностичних моделей, що відображають зв'язок діагностичних ознак з ознаками дефектів.*

*Проведений аналіз термодинамічного циклу Ренкіна, який застосовується в сучасній теплоенергетиці, за допомогою методів теорії катастроф.*

*Аналіз кривої рівноваги «пароводяна суміш» – «перегріта пара» дозволив отримати ознаки катастрофи, на основі яких доведено, що крива рівноваги «пароводяна суміш» – «перегріта пара» відповідає фазовому переходу першого роду.*

*Для термодинамічного опису фазових переходів використана модель Гінзбурга-Ландау. Встановлено, що за умови дотримання принципу Максвелла біфуркаційна множина катастрофи збірки складається з прямої, що відповідає фазовим переходам першого роду, і граничної точки, яка відповідає фазовому переходу другого роду.*

*Аналіз досліджень засвідчив, що запропонований підхід для вибору діагностичних параметрів дає можливість побудови адекватних аналітичних діагностичних моделей, а як визначальні діагностичні параметри пароперегрівача доцільно вибирати температури саме за ширмовими і конвективними ступенями пароперегрівача і, відповідно, встановлювати контрольні точки в системі діагностування.*

**Ключові слова:** *прямоточний котлоагрегат, система діагностування, діагностичні параметри, аналітичні моделі, пароперегрівач.*

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Пошкодження котлоагрегатів блоків 300 МВт становлять близько 80% всіх зупинок. За параметром потоку відмов для блоків 800 МВт є тенденція до підвищення надійності (тому що це найбільш економічне і надійне обладнання), а блоки 300 МВт такої тенденції не мають (тому що їх доводиться часто виводити в резерв) через складність контролю нестационарних потоків [1].

Відомі системи діагностики котлоагрегатів 300 МВт здійснюють в основному лише температурний контроль поверхонь нагріву і не виконують функції виявлення та діагностування порушень функціонування систем автоматичного керування (САК), не дозволяють оператору в будь-який момент вільно володіти впорядкованою інформа-

цією про стан САК, яка необхідна для виконання завдань керування ходом процесу [2; 3].

Моделі пароперегрівачів блоків 300 МВт, які призначені для вирішення завдань керування, непридатні для вирішення завдань синтезу алгоритмів виявлення і діагностики порушень, тому що для аналітичного дослідження діагностованості необхідна аналітична модель, що відображає зв'язок діагностичних ознак системи з ознаками дефектів.

Під час синтезу алгоритмів технічної діагностики однією з основних є завдання побудови адекватних діагностичних моделей, які однозначно пов'язують безліч можливих дефектів з безліччю доступних виміру технічних станів. Для оцінки таких властивостей діагностичних моделей

доцільно мати формалізовану процедуру оцінки або критерій діагностованості.

**Постановка задачі.** В сучасних енергетичних котлоагрегатах пароперегрівач є однією з основних теплосприймаючих поверхонь нагріву. Підвищення параметрів перегрітої пари сильно збільшує частку тепла, що отримується в пароперегрівачі, по відношенню до загального приросту ентальпії в котлоагрегаті. З підвищенням тиску величина приросту ентальпії падає. Це призводить до необхідних розділень пароперегрівача на велику кількість послідовно включених частин. Метал поверхні нагріву пароперегрівача має найвищу в котельному агрегаті температуру, що зумовлюється високою температурою пари і великими тепловими навантаженнями. Тому навіть порівняно невелике підвищення температури металу викликає значне зниження величини допустимих напружень. Пароперегрівач працює у важких експлуатаційних умовах і тому є одним з найбільш відповідальних елементів, що визначають надійність роботи котлоагрегату в цілому. Пароперегрівачі обладнані засобами для стабілізації температури перегрітої пари в тракці високого тиску і проміжного перегріву на заданому значенні. До точності підтримки температури перегріву висуваються дуже жорсткі вимоги. Характер динамічних процесів, що супроводжують керування перегрівом пари, сильно впливає на швидкість повзучості і термічну втому металу, а отже, на надійність роботи пароперегрівача. Тривале підвищення температури перегрітої пари і елементів конструкції пароперегрівача понад номінальне значення прискорює повзучість металу і тим самим скорочує термін його служби. Водночас тривале зниження температури перегріву призводить до зниження термодинамічного ККД котлоагрегату, а на проміжному перегріві, окрім того, ще й до підвищення вологості пари на останніх ступенях турбіни. Останній фактор зумовлює посилення ерозійного зносу лопаток і подальше зниження ККД проточної частини турбіни. Неприпустимі також і сильні коливання температури пари в пароперегрівних трактах котла. Адже у разі різкої зміни температури пари в масивних колекторах пароперегрівача виникають термічні напруження внаслідок того, що поблизу зовнішньої стінки температура металу не встигає швидко змінюватися. В таких випадках неоднакові температурні розширення зовнішньої і внутрішньої стінок масивної деталі ведуть до термічних напружень, втоми і окрупчування металу та появи тріщин цієї деталі. Паропере-

грівач як об'єкт діагностування можна представити у вигляді інерційної (динамічної) системи, на яку безперервно впливають експлуатаційні збурення у вигляді зміни навантаження, подачі палива і повітря, що призводять до відхилення температури пари на виході пароперегрівача. Для вибору визначальних діагностичних ознак пароперегрівача як об'єкта діагностування рекомендується провести аналіз фізичних процесів, що протікають в пароперегрівачі, з точки зору теорії катастроф.

#### Дослідження залежності зв'язку діагностичних параметрів з ознаками дефектів.

Для аналітичного дослідження діагностованості необхідно розробити аналітичну модель, яка відображає зв'язок діагностичних ознак системи з ознаками дефектів [4].

Кількісною характеристикою технічного стану об'єктів діагностування є визначальні діагностичні параметри  $\alpha_i$ ,  $i=1, q$ . Будь-який дефект об'єкта буде змінювати його технічний стан, що призведе до зміни визначальних діагностичних параметрів  $\alpha_i$ ,  $i=1, q$ . Дефект буде однозначно характеризуватися відхиленням поточного визначального діагностичного параметра  $\alpha_i$  від свого номінального значення  $\alpha_{in}$ . Тоді величина:

$$\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_{in} \quad (1)$$

буде діагностичною ознакою  $i$ -го виду дефекта.

Технічний стан об'єкта можна описати за допомогою  $q$ -мірного вектора діагностичних параметрів

$$\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_q], \alpha \in \Omega, \quad (2)$$

де  $\Omega$  – множина допустимих значень діагностичних параметрів.

Для вибору і аналізу визначальних діагностичних параметрів рекомендується провести аналіз термодинамічних процесів, що протікають в пароперегрівачі за допомогою методів теорії катастроф [5].

Формулювання основних положень термодинаміки в термінах елементарної теорії катастроф дозволяє розглядати рівняння стану процесу як  $n$ -мірне різноманіття в  $2n$ -вимірному просторі  $\mathbf{R}^n \otimes \mathbf{R}^n$   $n$  інтенсивних і  $n$  екстенсивних термодинамічних змінних. Це різноманіття збігається з критичним різноманіттям потенційних функцій  $V(\mathbf{x}; \mathbf{c})$ , що залежать від  $n$  змінних стану  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$  і  $k$  керуючих параметрів  $\mathbf{c} \in \mathbf{R}^k$ . Тоді аналіз фізичного процесу зводиться до дослідження рівноваги і локальної стійкості потенційної функції  $V(\mathbf{x}; \mathbf{c})$ :

$$\frac{\partial V}{\partial x_i} = 0 \quad \text{– рівновага}$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j} = 0 \quad \text{– локальна стійкість}$$
(3)

і критичних значень на гілках стійкої рівноваги. Перше з рівнянь (3) складається з  $n$  рівнянь стану. Воно може бути використано для виявлення їх залежності від керуючих параметрів  $c$ :

$$x^{(p)} = x^{(p)}(c), \quad p = 1, 2, \dots$$

Локальна стійкість  $p$ -ї критичної точки визначається видом матриці стійкості в точці  $(x^{(p)}(c); c)$ . Фазовий перехід відбувається в той момент, коли точка  $x \in \mathbf{R}^n$ , що описує критичний стан процесу, перескакує з однієї гілки на іншу. Фазовий перехід має місце, коли крива  $c_a(S) \in \mathbf{R}^k$  перескакує відповідну компоненту сепаратриси в  $\mathbf{R}^k$ . Якщо дотримуватися принципу Максвелла, то фазові переходи будуть мати місце при перетині кривої рівноваги компоненти максвеллівської множини  $\Phi_m$ , на яких не менше 2-х глобальних мінімумів вироджені.

Основним термодинамічним циклом, що застосовується в сучасній теплоенергетиці, є цикл Ренкіна (рис. 1) [6].

Цикл Ренкіна в  $T, S$  – діаграмі зображений на Рис. 2. Робочим тілом теплосилової установки є пара. Волога пара в конденсаторі повністю конденсується по ізобарі  $P_2 = \text{const}$  (т.3). Потім вода стискається насосом від тиску  $P_2$  до тиску  $P_1$ , цей адіабатний процес зображений в  $T, S$  – діаграмі вертикальним відрізком 3-5. Довжина відрізка 3-5 в  $T, S$  – діаграмі дуже мала, тому що в області рідини ізобари в  $T, S$  – діаграмі проходять дуже

близько одна від одної. З насоса вода під тиском  $P_1$  надходить в котлоагрегат, де до неї в ізобарному процесі ( $P_1 = \text{const}$ ) підводиться теплота. Спочатку вода в котлоагрегаті нагрівається до кипіння (ділянка 5-4) ізобари ( $P_1 = \text{const}$ ), а потім, після досягнення температури кипіння, відбувається процес пароутворення (ділянка 4-6 ізобари  $P_1 = \text{const}$ ). Потім в пароперегрівачі пара нагрівається до температури, що перевищує температуру при даному тиску  $P_1$  (ділянка 6-1). Після цього перегріта пара направляє в проточну частину турбіни, спочатку в канали соплової решітки, де відбувається процес адіабатного розширення. Точка 2 знаходиться в області вологої насиченої пари. Відпрацьована в турбіні пара надходить в конденсатор, в якому охолодженою водою від пари відбирається тепло (пар конденсується: процес 2-3) і перетворюється на воду (конденсат) з параметрами стану в точці 3.

Таким чином, 5-4-6-1 – це ізобарний процес передачі теплоти до води (5-4), пароводяної суміші (4-6) і перегрітої пари (6-1) в котлоагрегаті. Особливий інтерес на фазовій діаграмі представляє ділянка 6-1 (процес, що відбувається в пароперегрівачі), де різниця між рідкою і газоподібною фазами зникає.

Розглянемо т. 6, яка є граничною точкою на кривій фазових переходів першого роду. Навколо цієї точки має місце катастрофа збірки. Термодинамічні змінні  $P, T$  пов'язані з математичними параметрами управління:  $a = a(P, T)$ ,  $b = b(P, T)$  [7].

Якщо криву рівноваги фаз «пароводяна суміш» – «перегрита пара» ототожнити з максвеллівською множиною  $\Phi_m$  катастрофи збірки ( $a < 0, b = 0$ ), то отримаємо такі ознаки катастрофи:

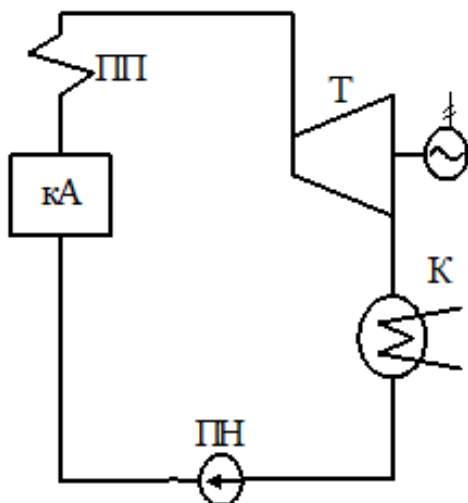


Рис. 1. Схема паросилової установки з перегрівом пари

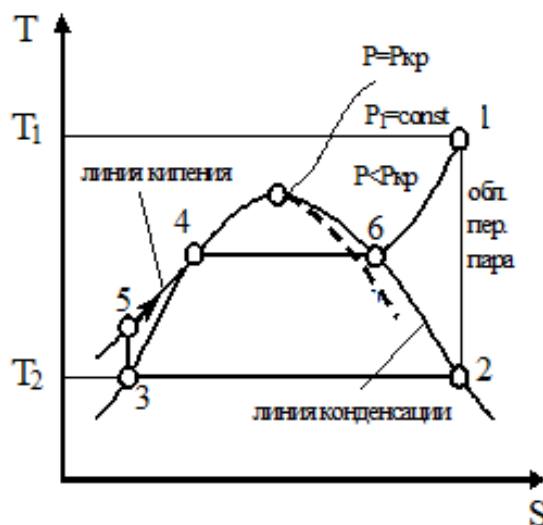


Рис. 2. Діаграма циклу Ренкіна з перегрівом пари



1. **Модальність.** Фізична система може мати два або більше різних фізичних станів, при цьому рідка і газоподібна фаза чітко визначені. Тобто потенціальна функція, яка описує систему, має більш ніж один локальний мінімум в деякій області зміни зовнішніх керуючих параметрів.

2. **Недосяжність.** Ця ознака катастрофи не має явного фізичного аналога.

3. **Катастрофічні стрибки.** Невеликі зміни температури і тиску призводять до великих стрибкоподібних змін об'єму.

4. **Розбіжність.** Перегріту пару з пароводяної суміші можна отримати або стрибкоподібно, якщо перетинати криву рівноваги, або безперервно – шляхом обходу навколо точки збірки С (рис. 3).

Близькі шляхи з близьких початкових станів можуть привести до якісно різних кінцевих станів.

5. **Гістерезис.** Гістерезис має місце, коли фізичний процес не є повністю зворотнім.

З Рис. 4 видно, що якщо С – точка збірки, то крива рівноваги фаз буде оточена спінодалями, за якими система вже не буде бімодальною.

6. **Розбіжність лінійного відгуку.** При невеликій зміні керуючих параметрів положення точки рівноваги буде трохи змінюватись. Однією з функцій відгуку однокомпонентних речовин є ізотермічна стисливість:  $k_t = -V^{-1}(\frac{\partial V}{\partial P})_T$ . Ця функція відгуку необмежено зростає по мірі наближення до кривої рівноваги фаз.

7. **Аномальні зміни.** Під час конденсації пари утворюються маленькі крапельки рідини, які осідають. Оскільки рідина густіше пари, при зворотньому переході (кипінні) невеликі пухирці газу, що утворюються всередині рідини, піднімаються вгору. При підході до критичної точки знизу різниця в густині двох фаз зникає,

і розміри крапельок і бульбашок зростають до величини, за якої відбувається дуже сильне розсіювання світла в даному середовищі. Через очікування аномально великих значень радіусів бульбашок і крапельок це явище назвали каламутністю. Таким чином, можна стверджувати, що точка кривої рівноваги «пароводяна суміш» – «перегріта пара» відповідає фазовому переходу першого роду.

Як правило, для термодинамічного опису фазових переходів використовують модель Гінзбурга-Ландау. Суть цієї моделі полягає в наступному. Для опису стану фізичної системи вводиться параметр порядку  $x$ . Повна енергія системи представляється у вигляді суми членів, що описують кінетичну  $\sim(\frac{dx}{dt})^2$  і потенційну  $V(x)$  енергію. Остання залежить як від зовнішніх керуючих параметрів, так і від змінної стану  $x$ . Стан спокою системи досягається в результаті мінімізації суми цих двох членів. У статичному випадку ( $\frac{dx}{dt}=0$ ) стан системи визначається величиною  $x$ , що мінімізує  $V(x)$ .

Потенціал Гінзбурга-Ландау:

$$V(x,a,b) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}x^2a + bx \quad (4)$$

має єдиний мінімум в точці  $x=0$  при  $a \geq 0$  і два рівних мінімуму в  $x = \pm \sqrt{-a}$  при  $a \leq 0$  (рис. 5).

Фазовий перехід другого роду відбувається при переході  $a$  через нуль. У цьому разі керуючий параметр  $a$  навколо критичної температури  $T_{кр}$  ідентифікується з  $T - T_{кр}$ , а біфуркаційна фазова діаграма представляє собою стандартний тризуб (рис. 6).

При температурах нижче критичної  $T_{кр}$  спостерігаються два стійких стану, а вище – лише один.

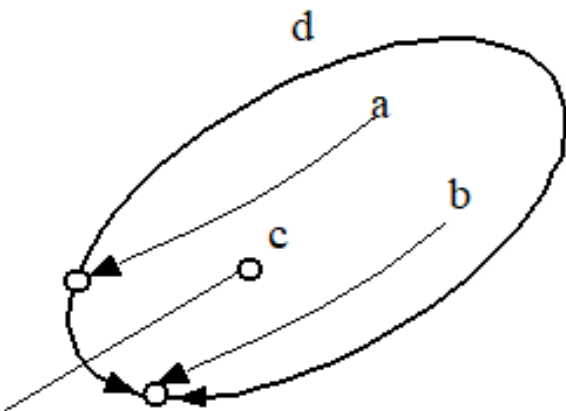


Рис. 3. Вплив збурень на криву рівноваги фаз

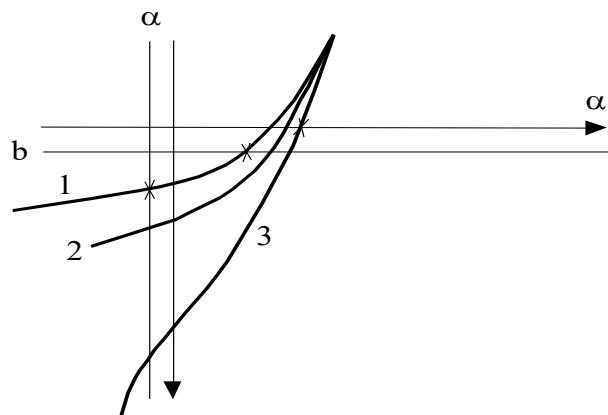


Рис. 4. Криві збурень фазових переходів

- 1 – спінодаль при низькій температурі та високому тиску
- 2 – лінія фазових переходів першого роду
- 3 – спінодаль при високій температурі та низькому тиску

$$V(x,a) = \frac{1}{4}x^4 - \frac{1}{2}ax^2$$

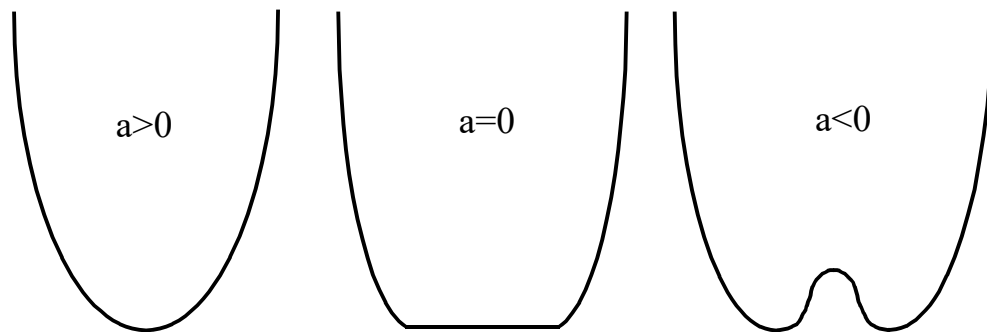


Рис. 5. Криві потенціалу Гінзбурга-Ландау

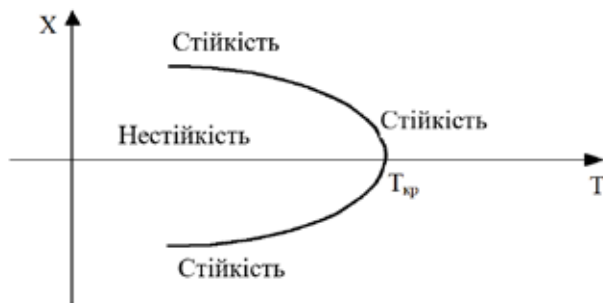


Рис. 6. Біфуркаційна фазова діаграма

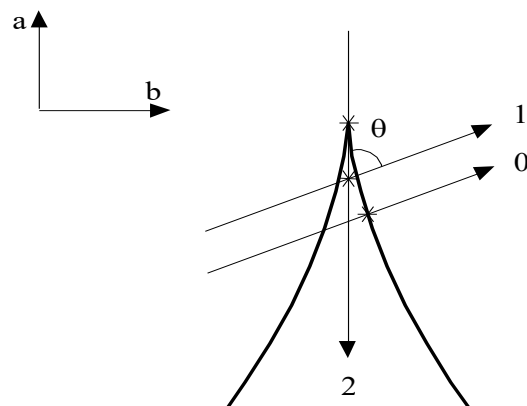


Рис. 7. Крива фазового переходу

Порядок фазового переходу залежить тільки від прийнятого принципу і шляху проходження. Оскільки криву рівноваги фаз «пароводяна суміш» – «перегріта пара» ми ототожили з максвеллівською множиною  $\phi_m$  ( $a < 0, b = 0$ ), то з Рис. 7 видно, що фазовий перехід відбувається в  $t^*$ , де змінна стану системи перескакує з правого мінімуму в  $x^{(r)} = \sqrt{-a}$  на лівий мінімум в  $x^{(l)} = -\sqrt{-a}$ . Потенційна функція в цих точках має рівні чисельні значення  $V^{(r)} = V^{(l)} = -\frac{a^2}{4}$ , однак перша похідна вздовж кривої 1 терпить розрив на максвеллівській множині.

Величину стрибка можна визначити, якщо обчислити значення:

$$\frac{d}{ds} V(\mathbf{x}; \mathbf{a}, \mathbf{b}) = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{ds} + \frac{\partial V}{\partial a} \frac{da}{ds} + \frac{\partial V}{\partial b} \frac{db}{ds} \quad (5)$$

на максвеллівській множині. Похідні  $\frac{da}{ds}$ ,  $\frac{db}{ds}$  можна інтерпретувати, як напрямлюючі косинуси, а

$$\frac{db}{da} = \left(\frac{db}{ds}\right) / \left(\frac{da}{ds}\right) = \text{tg}\theta \quad (6)$$

Оскільки  $\frac{dV}{dx} = 0$ , то

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dS} \Big|_{\phi_m} &= \left(\frac{1}{2}x^2 \cos\theta - x \sin\theta\right)^{(l)} - \\ &- \left(\frac{1}{2}x^2 \cos\theta + x \sin\theta\right)^{(r)} = -2\sqrt{-a} \sin\theta \end{aligned} \quad (7)$$

Ця функція описує фазовий перехід першого роду, оскільки її перша похідна зазнає розрив неперервності, який залежить не тільки від положення точки фазового переходу, але і від напрямку кривої рівноваги при її перетині максвеллівської множини.

Розглянемо криву 2. Уздовж цієї кривої  $S=0$  і

$$V(S)=0, S \geq 0; V(S) = -\frac{S^2}{4}, S \leq 0. \quad (8)$$

При  $S=0$  як сам потенціал, так і його перша похідна неперервні, проте друга похідна терпить розрив, оскільки:

$$\Delta \frac{d^2V}{dS^2} = \frac{d^2V(1)}{dS^2} - \frac{d^2V(0)}{dS^2} = -\frac{1}{2}. \quad (9)$$

Цей фазовий перехід уздовж кривої 2 є переходом другого роду.

**Висновки.** Точка кривої рівноваги фаз «пароводяна суміш» – «перегріта пара» відповідає фазовому переходу першого роду.

За дотримання принципу Максвелла біфуркаційна множина катастрофи збірки складається з напівпрямой ( $\mathbf{a}<\mathbf{0}$ ,  $\mathbf{b}=\mathbf{0}$ ), що відповідає фазовим переходам першого роду і граничної точки ( $\mathbf{a}=\mathbf{0}$ ,  $\mathbf{b}=\mathbf{0}$ ), яка відповідає фазовому переходу другого роду.

Під час розробки діагностичних аналітичних моделей пароперегрівачів як визначальні діагностичні параметри доцільно вибирати температури саме за ширмовим і конвективним пароперегрівачем і відповідно встановлювати контрольні точки в системі діагностування.

#### Список літератури:

1. Гвоздь М.Я., Горін У.З. Проблеми сучасного стану та перспектив модернізації вітчизняних теплоелектроцентралей. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сучасної теплоенергетики». Київ, 2020. С. 27.
2. Дубовский С.В. Современные проблемы и перспективы развития тепловой энергетики. *Проблеми загальної енергетики*. Київ, 2008. С. 7.
3. Макаров А.С. Актуальные проблемы теплоэнергетики Украины и их решение. *Энергетика и ресурсосбережение*. Київ, 2019, № 4.
4. Доценко Б.И. Диагностирование динамических систем. Киев : Техника. 1983. 186 с.
5. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Москва : Мир, 1984. 635 с.
6. Техническая термодинамика / Под ред. К.И. Крутова. Москва : Высшая школа, 1971. 325 с.
7. Бунь В.П., Онишко Я.С. Применение методов теории катастроф для анализа физических процессов в теплоэнергетке. *Международный научно-теоретический журнал «News of Science and Education»*. 2018. № 2. С. 46–51.

#### **Bun V.P., Bahan T.H. SELECTION OF DEFINITIVE DIAGNOSTIC PARAMETERS OF A STEAM HEATER OF A DIRECT-FLOW BOILER USING THE METHODS THEORY OF CATASTROPHE**

*The article studies the thermodynamic processes that take place in the superheater of a direct-flow boiler. To improve the quality of operation of the automatic diagnostic system, it is proposed to consider the thermodynamic processes that take place in the superheater in terms of catastrophe theory. An approach for the selection of determining diagnostic parameters, which are necessary for the construction of adequate analytical diagnostic models that reflect the relationship of diagnostic features with signs of defects, is proposed. An analysis of the thermodynamic cycle of Rankin, which is used in modern thermal power in terms of catastrophe theory. Analysis of the equilibrium curve steam-water mixture – superheated steam allowed to obtain signs of catastrophe. Based on the obtained signs of the catastrophe, it is proved that the equilibrium curve of steam-water mixture – superheated steam corresponds to the phase transition of the first kind. The Ginzburg-Landau model was used for the thermodynamic description of phase transitions. It is established that, following the Maxwell principle, the bifurcation set of the assembly catastrophe consists of a line corresponding to the phase transitions of the first kind and a boundary point corresponding to the phase transition of the second kind.*

*The analysis of researches showed that the offered approach for a choice of diagnostic parameters gives the chance to construct adequate analytical diagnostic models, and as defining diagnostic parameters of a superheater it is expedient to choose temperatures on screen and convective degrees of a superheater and accordingly to establish control points in diagnostic system.*

**Key words:** direct-flow boiler unit, diagnostic system, diagnostic parameters, analytical models, superheater.

**Василенко М.Д.**

Національний університет «Одеська юридична академія»

**Золотоверх Д.С.**

Національний університет «Одеська юридична академія»

**Новіков В.П.**

Національний університет «Одеська юридична академія»

**Рачук В.О.**

Національний університет «Одеська юридична академія»

## ТЕХНІКО-КОНФІДЕНЦІЙНІ АСПЕКТИ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОННО-ЦИФРОВОГО ПІДПISУ

*У статті розкрито зміст поняття ЕЦП та визначено, від чого залежить його надійність. Продемонстровано, яким чином ЕЦП здійснює підпис з забезпеченням надійної конфіденційності. Відзначено, що ЕЦП завжди потребує збереження конфіденційності, підтримання якої унеможлиблює отримання інформації не уповноваженою особою, представляючи собою сукупність даних, отриманих за результатом певного криптографічного перетворення деякого набору даних. ЕЦП створюється на основі гешу повідомлення, що надає йому можливість бути сталою довжиною достатньою простотою будь-яких повідомлень. Наведено характеристики геши-функції у вигляді комп'ютерного алгоритму, що перетворює масив даних довільної довжини у рядок бітів визначної довжини. Показано на практиці, як це відбувається з використанням відкритого і закритого ключів. Установлено, які загрози можуть виникати в зв'язку з використанням геши-функції. Визначено, які види шифрування використовують алгоритми ЕЦП. Розглянуто окремі алгоритми на практиці, встановлено основні кроки створення ЕЦП. Визначено, що використання відкритого ключа та вдосконалення норм діючого законодавства є ключовими напрямками вдосконалення ЕЦП. Описано види підробок і шляхи їх відтворення. Відображено механізм збереження та посилення конфіденційності під час передачі такого підпису, а також його законодавче закріплення в контексті змін, пов'язаних з розвитком інформаційних технологій. При цьому розвиток останніх завжди випереджає розвиток удосконалення законодавства. Як вагомий позитивний крок відзначено прийняття Закону України «Про електронні довірчі послуги», але зроблено застереження, що наразі потрібні технічні та організаційні доробки питань, пов'язаних саме з ЕЦП. Розкриттям сутності ЕЦП практично доведено, що, відображаючи організацію гарантованого застосування ЕЦП криптографічною системою з відкритим ключем, за якої відкритий ключ передається по відкритому (незахищеному) каналі та використовується як для перевірки ЕЦП, так і для шифрування повідомлення, слід констатувати його підвищену конфіденційність та надійність і те, що його практично неможливо підробити.*

**Ключові слова:** підпис, електронно-цифровий, конфіденційність, ключ, геши-функція, шифрування.

**Постановка проблеми.** В усі часи підписи здійснювалися та й продовжують здійснюватися власноруч підписантами. Так званий «мокрый» підпис, який має бути зроблено ручкою з чорнилом відповідного (чорного, фіолетового) кольору або за допомогою «шарикової» ручки, є підтвердженням візуалізації підписаного документа. Впровадження глобальних комунікацій спонукало розвиток систем електронного обміну даними, користувачами яких виступають як різні установи, так і громадяни. Електронно-цифровий підпис (ЕЦП) почав використовуватися в повсякден-

ній діяльності поряд з рукописним підписом і був покликаний стати аналогом рукописного підпису. Зазвичай рукописний підпис використовується як реквізит, що надає документу юридичну силу, а особа, яка його підписала, несе відповідальність за його зміст. ЕЦП має схожі цілі, але має дещо інший вигляд, на відміну від рукописного, бо він є числом, двійковим кодом, що зберігається в пам'яті комп'ютера. Якщо рукописний підпис є унікальним за рахунок певних письмово-рухових навичок, що характерні для кожної людини, то цифровий підпис відбувається завдяки певній про-

цедурі формування, параметри якої відомі лише особі, що здійснює такий підпис. При цьому саме підпис потребує збереження в комп'ютерній системі таких ознак інформації, як конфіденційність, цілісність, автентичність (справжність). Слід зауважити, що саме конфіденційність полягає у неможливості отримання інформації не уповноваженою особою, а цілісність полягає у неможливості будь-якої трансформації інформації не уповноваженою особою або ж уповноваженою, але без обґрунтованої на те мети. Такою трансформацією є його зміна, спотворення або взагалі знищення. Отже, ЕЦП представляє собою сукупність даних, отриманих за результатом певного криптографічного перетворення деякого набору даних, яка додається до цього набору даних або логічно поєднується з ним та надає можливість підтвердити його цілісність і спроможність, а також перевірити автентичність особи, яка підписалася. При цьому залишається важливим і те, що необхідно враховувати також доступність підпису, як властивість інформації бути отриманою уповноваженою особою за розумну кількість часу, а також підтвердження автентичності. Остання представляє собою властивість, що полягає ідентифікації заявленого ресурсу та ресурсу, який насправді визначається як джерело достовірної інформації. В зв'язку з вищенаведеним слушно зауважити, що конфіденційність, як цілісність та доступність самої інформації, залишається важливим складником теорії інформації та кодування, складаючи принципову характеристику ЕЦП.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відомих публікаціях, які були узагальнені в монографії [1], охоплені різні сторони теоретичних та практичних питань, пов'язаних з ЕЦП. Так, у цій же монографії [1] в тому числі обговорено стан та сутність деяких проблемних питань теорії та практики аналізу синтезу та застосування ЕЦП в інформаційних та інформаційно-телекомунікаційних системах різноманітного призначення. Наводяться результати класифікації, обґрунтування вимог і порівняльного аналізу механізмів і криптологічних протоколів на основі ЕЦП на час написання згаданої монографії. Попри достатню кількість розробок щодо ЕЦП, існують певні «вузькі місця» в цих дослідженнях (див. також [1]). У роботі [2] зроблено аналіз нових методів для формування ЕЦП, котрі базуються на нових математичних основах. Прийнято вважати, що кодова криптографія виявляється ефективною для побудови схем направленої шифрування та інкапсуляції ключів, тоді як для формування

та перевірки цифрового підпису вона не є раціональним рішенням через високу обчислювальну складність [3]. Сьогодні добре відомо, що конфіденційна інформація передається або зберігається таким чином, що неавторизований користувач не може розкрити її зміст. З цією метою первинна (відкрита) інформація підлягає криптологічному перетворенню та подальшому її зберіганню або передачі в перетвореному вигляді [4; 5, с. 129].

У роботах [6–8] розглядається кодова схема ЕЦП щодо її ефективності в порівнянні з поширеною альтернативною схемою CFS [9]. Йдеться про відчутне зниження обчислювальних затрат на формування підпису, що є вагомим практичним кроком для подолання основного недоліку кодових схем ЕЦП. Порівняльний аналіз методів й алгоритмів створення / перевірки ЕЦП показав, що одними з найпоширеніших стали алгоритми DSA (англ. DigitalSignatureAlgorithm) та RSA (RivestShamirAdleman) з використанням відкритого ключа (RSA став першим стандартизованим алгоритмом ЕЦП, який заснований на обчислювальній складності взяття логарифмів в кінцевих полях – авт.). Під час їх використання тільки один суб'єкт реально може створити геш-значення повідомлення, але будь-хто може перевірити його коректність. Таким чином, можна стверджувати, що більш-менш достатньою мірою розроблено застосування ЕЦП, у яких використовується різний математичний апарат за умови досягнення різних кількісних показників якості. При цьому існують обмеження з точки зору вибору параметрів генерування ключів, тобто фактично параметра криптографічного алгоритму ЕЦП, доступного суб'єктам відносин у сфері використання такого підпису. Однак існують також певні прогалини в реалізації конфіденційності в практичній площині самого підпису.

**Постановка завдання.** Метою статті є демонстрація практичних технічних можливостей на реалізацію ЕЦП за умови дотримання його зростаючої конфіденційності з встановленням її прийнятності.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Не викликає сумнівів той факт, що всі алгоритми ЕЦП не є ідеальними криптосистемами. Це можна пояснити тим, що усі алгоритми ЕЦП використовують ключі шифрування сталої довжини і, як наслідок, вразливі до атаки грубою силою. При цьому ЕЦП представляє собою вид електронного підпису, отриманого завдяки саме криптографічному перетворенню даних, що до них додаються, або поєднується з ними логічно. Надійність ЕЦП

принципово залежить від автентичності, автентифікації повідомлення, а також заперечення невизнання участі учасників. І тут, для автентичності, важливим фактором виступає впевненість у тому, що повідомлення не було змінено під час його передачі по каналу. Автентифікація повідомлення передбачає перевірку його адресанта. ЕЦП в комп'ютерних мережах дає змогу впевнитись у тому, хто насправді надіслав повідомлення. Невизнання участі фактично означає невизнання одного з об'єктів комп'ютерною системою події, яка відбулася. Невизнання характеризується як відмовою від авторства (заперечення причетності до утворення або передачі інформації), так і відмовою на одержання – заперечення причетності до отримання інформації. ЕЦП не дає змогу учасникам (адресанту та адресату) заперечувати причетність до процесу комунікації.

Підпис, завдяки математичним перетворенням, залежить від змісту повідомлення. Зазвичай підпис створюється на основі гешу повідомлення, що надає йому можливість бути сталою довжиною, а також надає обчислювальної простоти у випадках великих повідомлень.

Геш-функція представляє собою комп'ютерний алгоритм, що перетворює масив даних довільної довжини на рядок бітів визначної довжини (геш). У цьому разі ознаки геш-функції можна охарактеризувати наступним чином.

1. Гешування ідентичного повідомлення створює ідентичний геш.
2. Не потребує великої кількості обчислювальних ресурсів.
3. Наявність лавинного ефекту (мала зміна у повідомленні) призводить до значної зміни гешу.
4. Наявність низької вірогідності знаходження однакового гешу для різних повідомлень, коли обчислення такої пари повідомлень неможливо провести за визначений період часу.

Повідомлення, що підписане ЕЦП, складається з двох частин, власне самого повідомлення та під-

пису, як зображено на рис. 1. Якщо узагальнити моделі ЕЦП (див. [1, с. ]), можна дійти висновку, що всі алгоритми мають однакову схему. Загалом одні моделі відрізняються від інших саме математичними перетвореннями, що використовуються.

В той же час усі алгоритми ЕЦП використовують асиметричне шифрування, хоча ЕЦП можна побудувати навколо симетричного шифрування, такий алгоритм не буде надавати інформації, що передається, а тоді проявляються ознаки невизнання участі. Асиметричне шифрування передбачає використання закритого та відкритого ключа. Така назва пов'язана з використанням різних ключів під час шифрування та дешифрування, на відміну від симетричного шифрування, в якому такі ключі є ідентичними. Під час асиметричного шифрування відкритий ключ розповсюджується, а закритий – зберігається та є секретом, який має бути відомим тільки для особи, що здійснює підпис.

Для розповсюдження відкритого ключа в ЕЦП використовують сертифікат. Асиметричне шифрування в ЕЦП передбачає шифрування гешу. Головна мета шифрування в алгоритмі ЕЦП полягає в тому, що можна було б перетворити геш таким чином, щоб здатність зашифрувати належала лише особі, яка здійснює підписання (використовуючи закритий ключ), а здатність до розшифрування може здійснювати будь-хто відкритим ключем. Саме асиметричність надає можливість перевірити, хто здійснив ЕЦП, чи є ця особа такою, якій надано доступ до закритого ключа. У разі процесу створення ЕЦП поділяється на дві частини: створення підпису та його підтвердження (верифікація). При цьому повідомлення, що потрібно підписати, гешується. Повідомлення перетворюється на достатньо невелике число (порівняно з розміром повідомлення). Це пов'язано з тим, що, по-перше, геш у своїй більшості набагато швидше зашифровується, ніж саме повідомлення; по-друге, зашифрована інформація завжди має сталу довжину (залежить від обраної геш-функції).



Рис. 1. Схематичне зображення реалізації ЕЦП в підписаному повідомленні

Сьогодні найпопулярнішою геш-функцією є SHA-1, яка має розмір гешу 160 біт, вона використовується у таких стандартизованих алгоритмах, як DSA та ECDSA (згідно FIPS PUB 186-3 (версія стандарту, куди включено ЕЦП, який ґрунтується на DSA [10]).

Необхідно зазначити, що на практиці основним напрямом вдосконалення ЕЦП є використання відкритого ключа, але вимога щодо вдосконалення параметрів підпису передбачає і вдосконалення законодавчих актів (див. [11, 12]) щодо його технічних можливостей, які покликані використовувати функції гешування. Передусім мається на увазі перехід на SHA-2 або SHA-3 (геш-функції), які можуть створювати геші розміром 224, 256, 384 та 512 біт.

На першій стадії генерується пара ключів (відкритий-закритий), шифрується геш, зашифрований геш додається до повідомлення, повідомлення розповсюджується. На другій стадії дії дещо повторюються, але у зворотному напрямі. Коли особа, що хоче впевнитися в автентичності повідомлення, відокремлює повідомлення від його ЕЦП. І, нарешті, відбувається розшифровування повідомлення відкритим ключем. Як було зазначено вище, оскільки доступ до відкритого ключа необмежений, будь-хто може розшифрувати підпис та отримати геш. Далі здійснюється перевірка гешу, гешування повідомлення. Якщо повідомлення автентичне – геші збігаються. Схема ЕЦП зображена на представленому рис. 2. У цьому випадку криптоаналіз виступає дуже важливим складником, бо передбачає знаходження вразливостей

або обхід схеми ЕЦП. При цьому криптоаналітик може застосовувати різні можливості. В такому разі найслабшою атакою може бути така, за якої криптоаналітик володіє лише загальновідомою інформацією про алгоритм здійснення ЕЦП.

Прикладом може бути використання методу «грубої сили», коли шляхом перебору обирається дійсна пара підпис-повідомлення. Така атака не є загрозою, адже під час розробки будь-якої якісної системи такий фактор враховується. За рахунок великого розміру ключа криптографічної функції, такий підбір не є можливим за обмежену кількість часу. В такому випадку криптоаналітик може відслідковувати підписані повідомлення та створювати таблицю пар повідомлень і дійсних підписів, а в подальшому використовувати їх. Така атака (перевірка) має назву відомих повідомлень (англ. Known Message Attack). Окремим видом є атаки, пов'язані з піддробкою підпису (англ. Signature Forgery), тобто атаки, що передбачають створення підпису для повідомлення, яке не створено уповноваженою особою.

Серед таких підробок слід виділити такі:

1. Екзистенційна підробка – така, що передбачає створення хоча б одного дійсного підпису для повідомлення, не створеного у минулому уповноваженою особою. Зазвичай таке повідомлення є довільного змісту (наприклад, довільний набір символів, довільної довжини) і обирається криптоаналітиком, через що зазвичай не несе у собі загрози.

2. Вибіркова підробка – така, що передбачає створення пари дійсного підпису та такого пові-

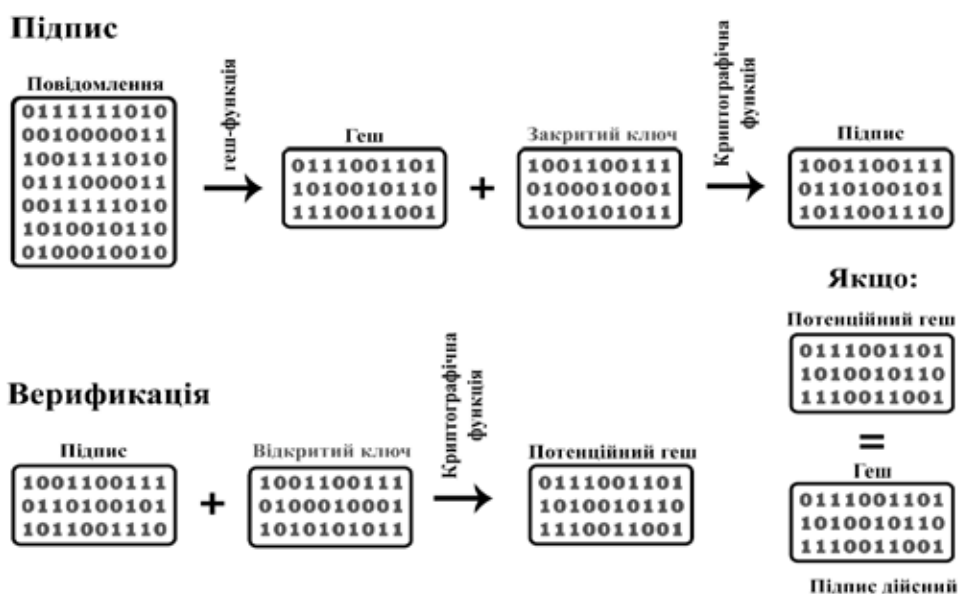


Рис. 2. Схема ЕЦП



домлення, що було обрано криптоаналітиком до здійснення атаки. Вибірковість пов'язана з улаштуванням алгоритму, що надає певним повідомленням такі особливості, що дають змогу криптоаналітику розрахувати пари. Криптоаналітик, знаючи ці особливості, може з певною вірогідністю створити таке повідомлення та розрахувати для нього дійсний підпис. Зазначимо, що універсальна підробка надає криптоаналітику можливість створення повідомлення будь-якого змісту.

Окремо слушно виділити атаку, що передбачає повний злам системи ЕЦП, у тому числі й оволодіння секретом підпису.

Оскільки більшість ЕЦП оперують гешом, існують певні загрози, пов'язані з використанням геш-функції. Найпоширенішою з них вважають атаку, яку пов'язують з такою особливістю гешу, як його стала довжина. Оскільки кількість різних гешів, що можна обчислити, за змістом стає досить великою, тому існує можливість колізії – явища, за якого різні повідомлення матимуть один геш. В такому разі, якщо довжина дорівнює 160 біт, то кількість буде дорівнює  $2^{160}$ , а якщо 512 біт, то  $2^{512}$ . Врешті решт існує можливість підробити геш одного повідомлення іншим.

Слід також відзначити, що в разі, коли геш-функція є односторонньою, створення гешу повідомлення залишається простим, а відновлення повідомлення з гешу стає надзвичайно складним для обчислювання. Таке відновлення передбачає використання методу «грубої сили». І хоча для однієї особи згенерувати геш-таблицю пар повідомлення – геш, не є можливим, такі таблиці все ж таки існують у відкритому доступі у мережі Інтернет.

Реалізація ЕЦП набула популярності у наступних алгоритмах: RSA (алгоритм, створений у 1978 році), який став першим стандартизованим алгоритмом ЕЦП. В основі алгоритму лежать математичні операції, пов'язані із задачами факторизації, що являє собою розкладання великих чисел (більше ніж 2 200) на множники – числа, що ділять число націло.

Надалі (1985 р.) була створена схема підпису, яка використовує обчислення дискретного логарифму. І хоча така схема не набула загального використання, згодом була перетворена Агентством національної безпеки США на DSA.

DSA представляє собою алгоритм, стандартизований DSS (англ. Digital Signature Standard) FIPS-186-1, FIPS-186-2, FIPS-186-3, FIPS-186-4. Він використовує асиметричне шифрування, основане на піднесенні до степеня за модулем при дискретному логарифмуванні.

Розглянемо алгоритм DSA на практиці. Для демонстрації була використана мова програмування Python 3.7.3.

Наприклад, припустимо, нам потрібно підписати повідомлення, що має наступний зміст:

*Привіт, це повідомлення підписане.*

Де «Привіт, це повідомлення підписане».

Для початку генеруємо числа  $p$ ,  $q$ ,  $g$ ,  $h$ ,  $a$

Алгоритм складається з двох основних частин: з генерації пари відкритого-закритого ключа та здійснення підпису і його підтвердження.

Перша частина складається за наступних кроків:

1) Обирається просте число  $p$ , довжина  $L$  якого становить від 512 до 1 024 біт:  $512 \leq L \leq 1024$ ,  $L$  повинно ділитися націло на 64. Також число  $(p-1)$  повинно мати дільник  $q$ , котрий 160 біт у довжину:  $(p-1) \bmod q = 0$

2) Обирається число  $g$ , що задовольняє наступним умовам:

–  $g$  повинно бути цілим числом

–  $1 < g < p$

–  $g^{q \bmod p} = 1$

–  $g = h^{((p-1)/q) \bmod p}$

3) Обчислюється число  $h$ :  $h = g^a \bmod p$

4) Обирається число  $a$ , яке задовольняє умові  $2 < a < q-1$

Набір чисел  $p$ ,  $q$ ,  $g$ ,  $h$  є відкритим ключем, а набір  $p$ ,  $q$ ,  $g$ ,  $a$  – закритим.

$p=1423128437294386871227476743917667$   
 $35442867525591692880598116768655581788$   
 $02536430264831718390836472450265092948$   
 $01789166564719182708841977615765959424-$   
 $00577131999166332479365641$

$q=1090253430700240822105942483552272273$   
 $919983077513$

$g=4571682647781247451573724771764474$   
 $80095613306159678195073287887089001930$   
 $42576863420433629126009897634843083930$   
 $52159778924770825861992741958631001455-$   
 $9733746991172640185886761$

$h=1208040376985201793958262626499512$   
 $46462471839164693911421066953867073160$   
 $95839252272939009348472032944068556288$   
 $69992602976316708461420947580202993235-$   
 $39321973673099918472692569$

$a=2053256546193605077330067469512861935$   
 $92917929914$

На другій стадії обирається геш-функція (зазвичай SHA-1). Для створення електронного підпису виконуються наступні кроки:

1) за допомогою геш-функції, повідомлення, що підписується, перетворюється на число-геш  $H$ .



$H=3378520346201073884153985227189397825$   
 $24511422999$

2) Генерується число  $k$ , що є більшим 0 та меншим від  $r$  ( $0 < r < q-1$ )

3) Обчислюється число  $r$  за наступною формулою:  $C1 = g^{r(\text{mod } p)(\text{mod } q)}$ . Якщо  $C1$  дорівнює нулю, потрібно брати інше  $r$ .

4) Обчислюється  $C2$  за наступною формулою:  $C2 = (H + aC1)r^{-1(\text{mod } q)}$

5) Якщо  $C2$  дорівнює нулю, перебирається число  $r$ .

Підписом є пара  $C1 C2$

$C1=832043819108692318357721515142593963$   
 $17346243527$

$C2=354423173594352506035878605268929174$   
 $32814918358$

Для підтвердження повідомлення відбувається процес верифікації, який складається з наступних кроків:

1) Повідомлення знову перетворюється на геш  $H$ , використовуючи ідентичний алгоритм гешування, що і під час створення підпису.

2) Обчислюється число  $t1 = HC2^{-1(\text{mod } q)}$

3) Обчислюється число  $t2 = C1 C2^{-1(\text{mod } q)}$

Підпис визнається як дійсний, якщо виконується рівність  $g^{t1} h^{t2(\text{mod } p)(\text{mod } q)} = C1$

$g^{t1} h^{t2(\text{mod } p)(\text{mod } q)} = 8320438191086923183577$   
 $2151514259396317346243527 = C1$

Таким чином, саме такий підпис слід вважати дійсним. Обсяги публікації не дозволяють навести коди програми та відповідні суто технічні розрахунки, тим більше, що в цілому сьогодні вони достатньо відомі. Однак проведені розрахунки дозволяють все ж таки суттєво покращити техніко-конфіденційні характеристики ЕЦП. Вимоги часу щодо ЕЦП та вимоги до посилення його конфіденційності дозволили посилити останню і зробити її універсальною, затверджуючи такий підхід на законодавчому рівні [11]. Як відомо, до його вступу в силу діяв Закон України «Про електронний цифровий підпис» зі змінами [12], який втратив чинність на підставі Закону № 2155-VIII від 05.10.2017, ВВР, 2017, № 45, ст. 400 «Про електронні довірчі послуги» [11]. Відзначимо, що Закон [12] не враховував питання конфіденційності та не був спрямований на вирішення пов'язаних з нею задач. З аналізу технічної та юридичної сторони реалізації багатьох питань в галузі інформаційних технологій та їх захисту відомо, що технічна сторона завжди випереджає юридичну. Тому таке співвідношення не є дивним. Однак законодавчий складник має підтягуватися до технічних змін більш швидкими тем-

пами і, як наслідок, прийняття зазначеного Закону слід вважати вельми прогресивною подією. Закон [11] розширив розуміння ряду дефініцій, зокрема, ввівши в нього такі поняття, як відкриті та особисті (авт. – закриті) ключі, кваліфікований підпис, під яким розуміється удосконалений електронний підпис, створений з використанням засобу кваліфікованого електронного підпису і базований на кваліфікованому сертифікаті відкритого ключа, а також розкривши питання надання електронних довірчих послуг, а саме, запроваджуються такі механізми, як електронна ідентифікація, електронний підпис, електронна печатка, реєстрована електронна доставка, тощо. Так, у цьому Законі передбачено взаємне визнання українських та іноземних сертифікатів відкритих ключів та електронних підписів. Однак ще потрібні технічні та організаційні доробки питань, пов'язаних саме з ЕЦП. В зв'язку саме з цим згідно з пунктом 1 (див. розділ VII «Прикінцеві та перехідні положення» Закону України «Про електронні довірчі послуги») його введення було перенесено на рік, а пункт 5 (VII розділу цього Закону), щодо ЕЦП та відкритого ключа, законодавчо залишається не введеним досі, а чинні сертифікати продовжуватимуть діяти. Однак не можна не відмітити з юридичної сторони, що Закон [11] інтегрує в собі всі попередні здобутки у сфері застосування ЕЦП.

**Висновки.** Отже, завдяки дослідженню сутності ЕЦП у контексті його конфіденційності, практично доведено, що, відображаючи організацію гарантованого застосування ЕЦП криптографічною системою з відкритим ключем, за якої відкритий ключ передається по відкритому (незахищеному) каналу зв'язку та використовується як для перевірки ЕЦП, так і для шифрування повідомлення, практично реалізується його підвищена конфіденційність та надійність за рахунок відповідного гешування, а також така важлива властивість, що практично його (ЕЦП) стає неможливо підробити. ЕЦП, як кваліфікований електронний підпис, закріплено вже діючим українським законодавством, але ще не повністю реалізовано технічно. Однак за умови технічній спроможності ЕЦП реалізується в режимі підвищеної конфіденційності. При цьому створюється посилений сертифікат розділу ключа, котрий підтверджує його використання саме в режимі підвищеної конфіденційності через наявність кваліфікованого сертифікату електронного підпису, що має йому відповідати. Перспективами подальшої роботи вбачаємо продовження досліджень в галузі вдосконалення елементів, що підвищують конфіденційність вказаного підпису.

**Список літератури:**

1. Горбенко Ю.І., Горбенко І.Д. Інфраструктури відкритих ключів. Електронний цифровий підпис. Теорія та практика : монографія. Харків : Видавництво «Форт», 2010. 608 с.
2. Computer Security Division I.T.L. Post-Quantum Cryptography | CSRC | CSRC, CSRC | NIST. 2017. URL: <https://content.csrc.eic.nist.gov/Projects/Post-Quantum-Cryptography/faqs>
3. Overbeck R., Sendrier N. Code-based cryptography. Post-Quantum Cryptography / Ed. Bernstein D.J., Buchmann J., Dahmen E. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. P. 95–145.
4. Матов О.Я., Василенко В.С., Василенко М.Ю. Несиметричне кодування з використанням лишкових класів. Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Aplikovan vedecke novinke – 2013. (Прага, 27 липня – 05 серпня 2013 р.). Praha : Publishing House: Edication and Science. s.r.o. 2013. Т. 13. С. 35–40.
5. Василенко В.С. Код условных вычетов: монографія. LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, Deutschland. 2013. 238 с.
6. Kuznetsov A., et al. Code-based electronic digital signature. 2018 IEEE 9-th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2018. P. 331–336.
7. Kuznetsov A., et al. New Approach to the Implementation of Post-Quantum Digital Signature Scheme. 2020 IEEE. 11-th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2020. P. 166–171.
8. Kuznetsov A., et al. Code-Based Schemes for Post-Quantum Digital Signatures. 2019. 10-th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems : Technology and Applications (IDAACS). 2019. Vol. 2. P. 707–712.
9. Courtois N.T., Finiasz M., Sendrier N. How to Achieve a McEliece-Based Digital Signature Scheme. Advances in Cryptology. ASIACRYPT 2001 / ed. Boyd C. Berlin, Heidelberg: Springer, 2001. P. 157–174.
10. FIPS Digital Signature standard: 2009. National Institute of standard and technology. 2009. [https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/fips/186/3/archive/2009-06-25/documents/fips\\_186-3.pdf](https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/fips/186/3/archive/2009-06-25/documents/fips_186-3.pdf)
11. Закон України «Про електронні довірчі послуги» № 2155-VIII від 05.10.2017 зі змінами, внесеними згідно із Законом № 440-IX від 14.01.2020. *Відомості Верховної Ради*. 2017. № 45. Ст. 400.
12. Закон України «Про електронний цифровий підпис» № 852-IV від 22.05.2003 зі змінами внесеними в різні роки, останні зміни, внесені згідно з Законом № 1666-VIII від 06.10.2016. *Відомості Верховної Ради України*. 2003. № 36. Ст. 276.

**Vasilenko M.D., Zolotoverkh D.S., Novikov V.P., Rachuk V.O. TECHNICAL AND CONFIDENTIAL ASPECTS OF THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE ELECTRONIC-DIGITAL SIGNATURE**

*The meaning of the concept of EDS is revealed and the factors, on which its reliability depends, are determined in the article. It is demonstrated how the EDS carries out the signature with the provision of reliable confidentiality. It is noted that EDS always requires the preservation of confidentiality, the maintenance of which makes it impossible to obtain information by an unauthorized person, representing a set of data obtained as a result of a certain cryptographic transformation of a data set. EDS is created based on the message hash, which allows it to be a constant length of sufficient simplicity of any message. The characteristics of the hash function are presented in the form of a computer algorithm that converts data array of random length into a string of bits of definite length. It is shown in practice how it happens with the use of public and private keys. The threats that may arise from the use of the hash function are identified. The types of encryption that are used by EDS algorithms are determined. Some algorithms are considered in practice; the basic steps of creation of EDS are established. It is determined that the use of public key and improvement of current legislation are the main means for improving EDS. The types of counterfeits and ways of their reproduction are described. The mechanism of preservation and strengthening of confidentiality at transfer of such signature, as well as its legislative regulation in the context of the changes connected with development of information technologies is reflected. Herewith, the development of the latter always precedes the development of improved legislation. The adoption of the Law of Ukraine “On Electronic Trust Services” was noted as a significant positive step, but it was mentioned that technical and organizational improvements in EDS-related issues are currently needed. The disclosure of the essence of EDS practically proves that reflecting the organization of guaranteed use of EDS by a cryptographic system with a public key, in which the public key is transmitted over the public (unprotected) and is used for both EDS verification and message encryption, its increased confidentiality and reliability should be stated. Also, it is almost impossible to fake it.*

**Key words:** signature, electronic-digital, confidentiality, key, hash function, encryption.

**Васильєв М.В.**Інститут енергетики та комп'ютерних систем управління  
Державного університету «Одеська політехніка»

## НАЛАШТУВАННЯ НЕЧІТКОГО АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗРІДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Вивчено основні властивості об'єкта, а також методи, за допомогою яких можна знаходити нові параметри для регулятора компресорної установки для зрідження природного газу. Досліджено основні властивості самого адаптивного регулятора, а також розроблено метод, за яким і було виконано роботу. Також здійснено порівняння з іншими видами автоматичних систем керування, які можуть застосовуватись у цьому об'єкті. Вивчено послідовність будування адаптивного регулятора та його взаємодію з об'єктом. Досліджено вихідні результати адаптивного регулятора та порівняно їх з іншими автоматичними системами керування. Вивчено загальні властивості та правила будування адаптивного регулятора, основні тонкощі під час роботи з ним. Розглянуто нові можливості для регулювання компресорної установки для зрідження природного газу та виведено основні правила щодо застосування цього адаптивного регулятора. Також досліджено ефективність застосування адаптивного регулятора для цього об'єкта та зроблено висновки щодо роботи регулятора та ефективності його результатів. У процесі дослідження встановлено послідовність дій для побудови адаптивного регулятора, його налаштування та використання для пошуку необхідних параметрів регулятора. Установлено, що для налаштування адаптивного регулятора потрібно мати певні знання щодо налаштування регуляторів для інших об'єктів та мати можливість використовувати їх для виведення необхідних параметрів адаптивного регулятора, які є в налаштуваннях. Проаналізовано ефективність застосування адаптивного регулятора для компресорної установки для зрідження природного газу. Виявлено певні моменти щодо адаптивного регулятора, які потребують доопрацювання та корегування щодо налаштування пошуку параметрів регулятора. Зроблено висновки стосовно використання цієї методики сьогодні.

**Ключові слова:** компресор, зрідження, природний газ, адаптивний регулятор, ефективність адаптивного регулятора.

**Постановка проблеми.** Нині проблематикою є те, що сам об'єкт мало вивчається у науковому колі, а також майже немає джерел у відкритому доступі, які би допомогли більш детально розкрити основні моменти в регулюванні установки для зрідження природного газу. Також мало вивчена тема застосування різних автоматичних систем керування установки для зрідження природного газу. Тема використання адаптивного регулятора для цього об'єкта є маловивченою, тому в цій статті буде розглянуто саме використання адаптивного регулятора для установки для зрідження природного газу, адже має право на життя глибокий аналіз цього регулятора, його вплив на остаточне регулювання об'єкта та ефективність регулювання в процесі застосування цього регулятора.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивчення останніх публікацій у відкритих джерелах інформації дало змогу визначити, що у відкритому доступі наразі дуже мало інформації щодо застосування адаптивного регулятора для

установки для зрідження природного газу. Точніше такої інформації майже немає у відкритих джерелах, тому доводиться більш поглиблено вивчати цю тему, маючи в наявності лише невелику кількість літератури, яка б змогла продемонструвати чітку послідовність дій для побудови та застосування адаптивного регулятора. Були вивчені публікації таких авторів, як В.А. Шаміна, Ю.Б. Галеркін, О.Ю. Леоненков.

**Постановка завдання. Мета статті** – дослідити ефективність використання адаптивного регулятора для установки для зрідження природного газу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Спочатку треба згадати, чим саме є компресорна установка для зрідження природного газу. Наразі природний газ є найчистішим і одним із найдешевших органічних видів палива. Основною проблемою природного газу є транспортування на велику відстань. Рішенням цієї проблеми є скраплення газу за допомогою криогенних установок.

Тепер у нас виникає чітке розуміння того, навіщо взагалі потрібен цей об'єкт і чому важливо максимального його дослідити, адже без цього не буде можливим створення ефективної системи автоматизації для цього об'єкта.

Ще треба коротко описати компресорну установку для зрідження природного газу. Відцентрові компресори становлять обладнання, що входить до групи компресорів динамічного типу з радіальною конструкцією. Головною перевагою установок такого типу є їх висока продуктивність, яка значно перевищує показники компресорів інших видів. З огляду на це, відцентрові компресори, структура яких дозволяє використовувати їх за умов інтенсивної експлуатації, широко використовуються в промислових масштабах.

Детально вивчивши те, чим є компресор для зрідження природного газу, та повністю розглянувши принцип дії, визначимо, чим взагалі є адаптивний регулятор.

У процесі управління складними об'єктами, що функціонують в умовах нестационарності, широкого застосування набули адаптивні регулятори, що реалізують типові ПІ-закони або ПІД-закони регулювання. Слід зазначити, що цей метод передбачає виведення об'єкта у сферу автоколивальності за рахунок переходу на ПІ-закон і грубого варіювання коефіцієнта посилення  $K_p$ . Однак низка технологічних процесів за умовами експлуатації не допускають автоколивального режиму. Таким чином, завдання знаходження оптимального методу адаптації залишається відкритим. Водночас останнім часом широкої популярності набули нечіткі моделі й алгоритми управління. Відомо, що нечітке управління засноване не стільки на використанні аналітичних або теоретичних моде-

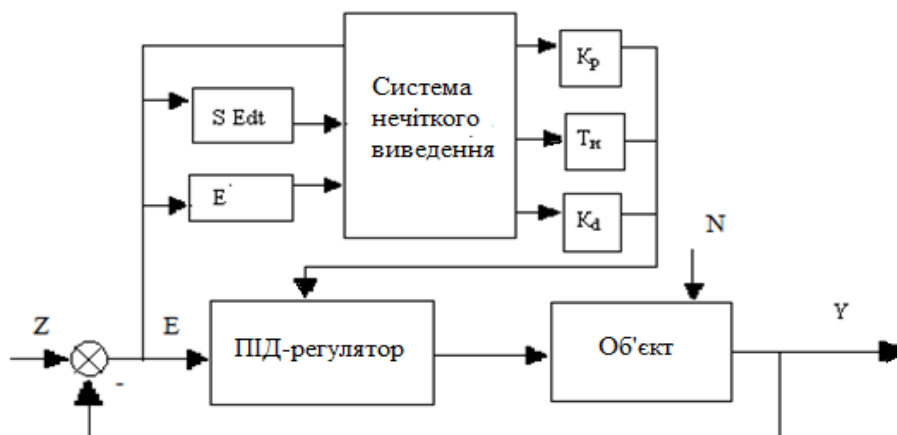
лей, скільки на практичному застосуванні знань кваліфікованих фахівців, представлених у формі лінгвістичних баз правил. Нечітке управління є ефективним у випадках недетермінованості параметрів об'єктів, коли існує певний досвід експертів з управління і налаштування автоматизованої системи регулювання (далі – АСР). Теорія нечіткої логіки дозволяє використовувати знання фахівців-наладчиків із метою поліпшення процесів управління і надання допомоги з налаштування типових регуляторів. Виходячи з вищесказаного, зазначимо, що завдання створення методу адаптації ПІД-регулятора, що реалізує досвід наладчиків, стає актуальним [4].

**Метою статті** є розробка нечіткої експертної системи, що визначає оптимальні настройки ПІД-регулятора, для його адаптації до об'єкта управління, а також її апробація в пакеті Matlab (Simulink).

Дізнавшись, чим є адаптивний регулятор і для чого він взагалі потрібен, перейдемо до етапів, які допоможуть створити саме автоматичну систему керування, до складу якої буде включено як установку для зрідження природного газу, так і сам адаптивний регулятор. На першому етапі ми визначимо структуру адаптивної системи регулювання. Ця структура зображена на рисунку 1.

На другому етапі в програмі Matlab (FLT) створюється система нечіткого виведення або адаптера. Це зображено на рисунку 2.

На третьому етапі проводяться фазифікації вхідних і вихідних лінгвістичних змінних (далі – ЛП). Фазифікації вхідних значень (помилки регулювання ( $E$ ), її інтеграла і похідної). Графіки функцій належності вхідних ЛП представлені на рисунках 3, 4, 5.



**Рис. 1. Структура адаптивного нечіткого керування**

Де:  $E$  – помилка;  $Z$  – завдання;  $Y$  – значення на виході;  $N$  – збурення;  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $K_d$  – налаштування ПІД-регулятора;

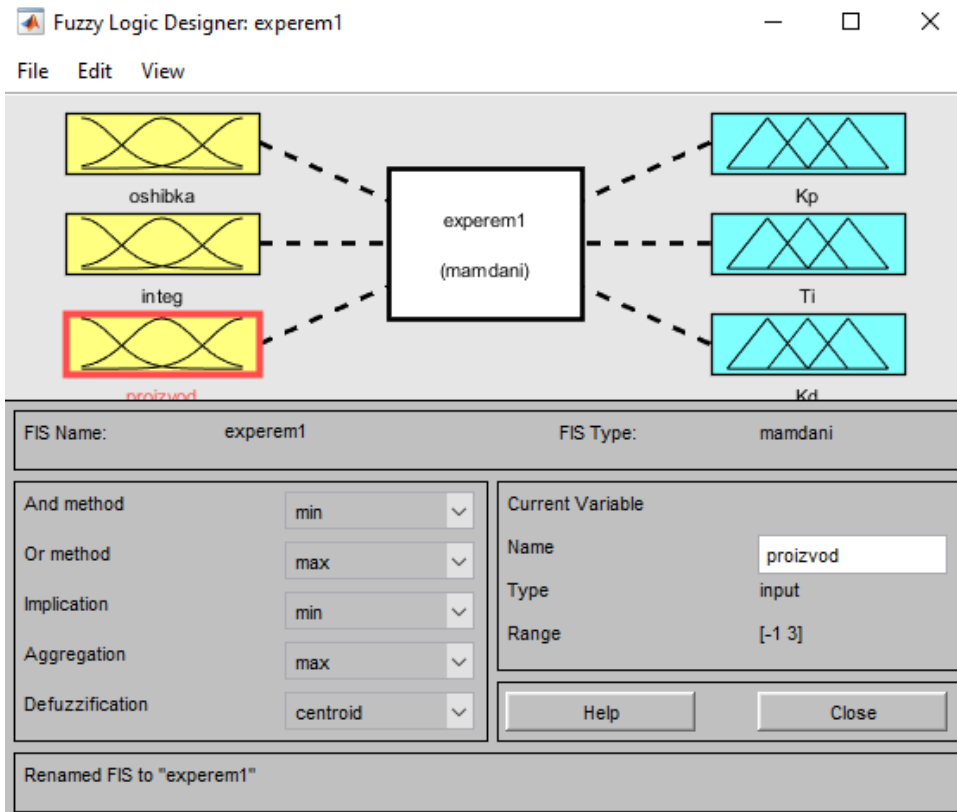


Рис. 2. Графічний інтерфейс редактора FIS

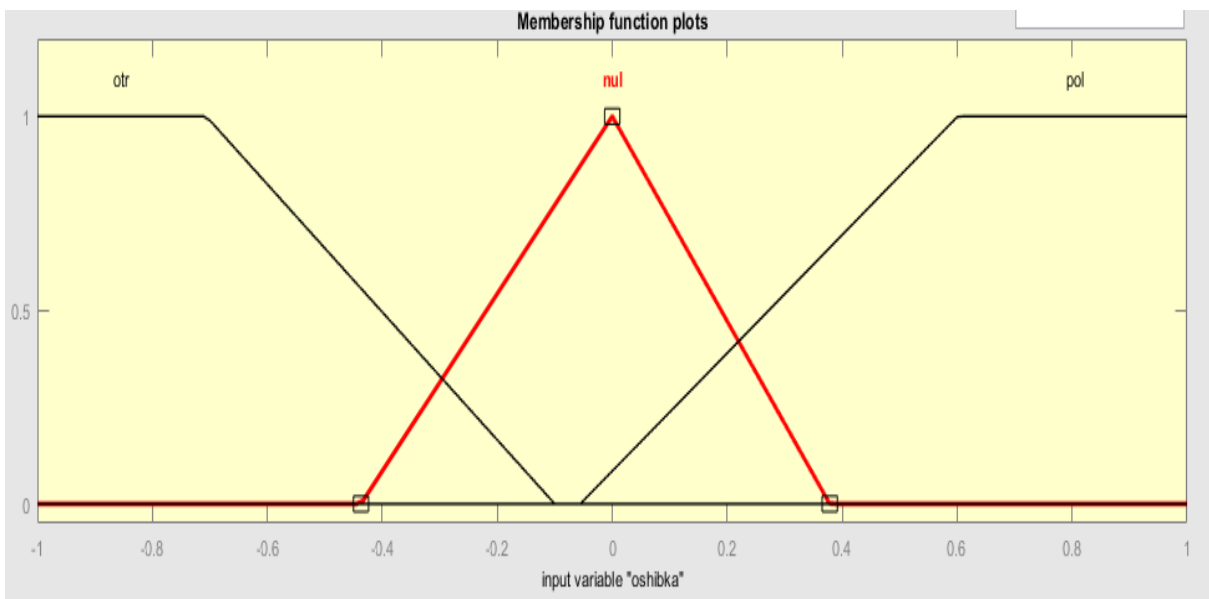


Рис. 3. Функція належності ЛП «помилка»

Четвертий етап полягає у створенні бази правил виду «ЯКЩО ..., ТО». Спираючись на рекомендації зі спеціалізованої літератури, проведені експерименти у FLD-редакторі, а також досвід експертів-налагодчиків систем автоматизації, пропонуються такі правила: ЯКЩО «помилка є негативною» І «інтеграл помилки є маленьким» І «похідна помилки є нега-

тивною», ТО «Кр є великим», «Ти є великим», «Кd є великим». Ця база правил наведена на рисунку 6.

Тепер переходимо до перевірки автоматичної системи керування. Сама система представлена на рисунку 7.

На виході система дала нам такі значення налаштувань, які зображені на рисунку 8.

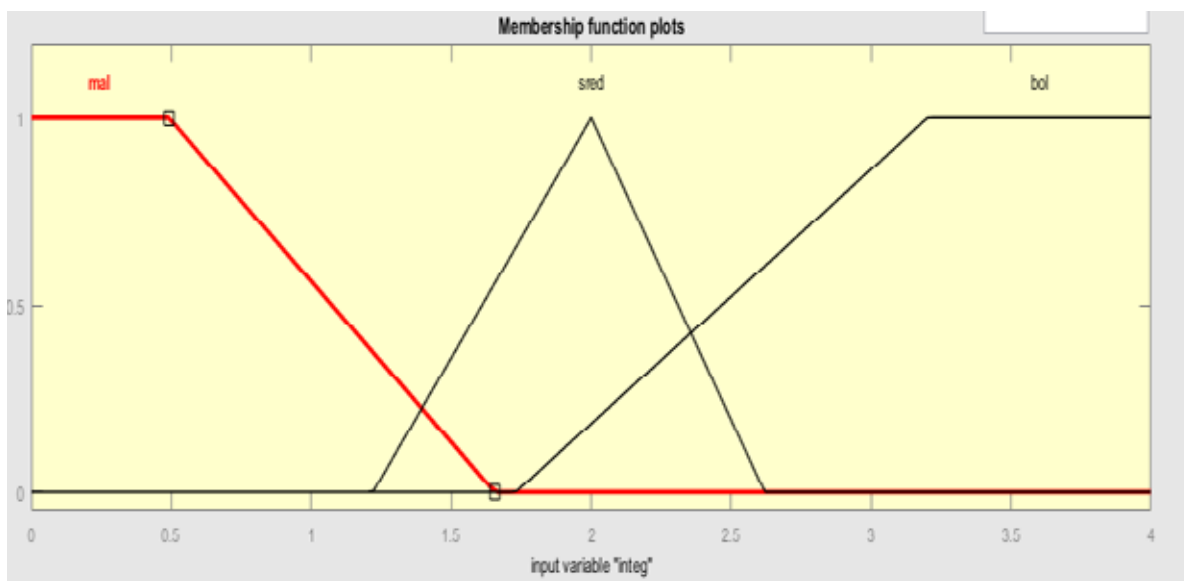


Рис. 4. Функція належності ЛП «інтеграл помилки»

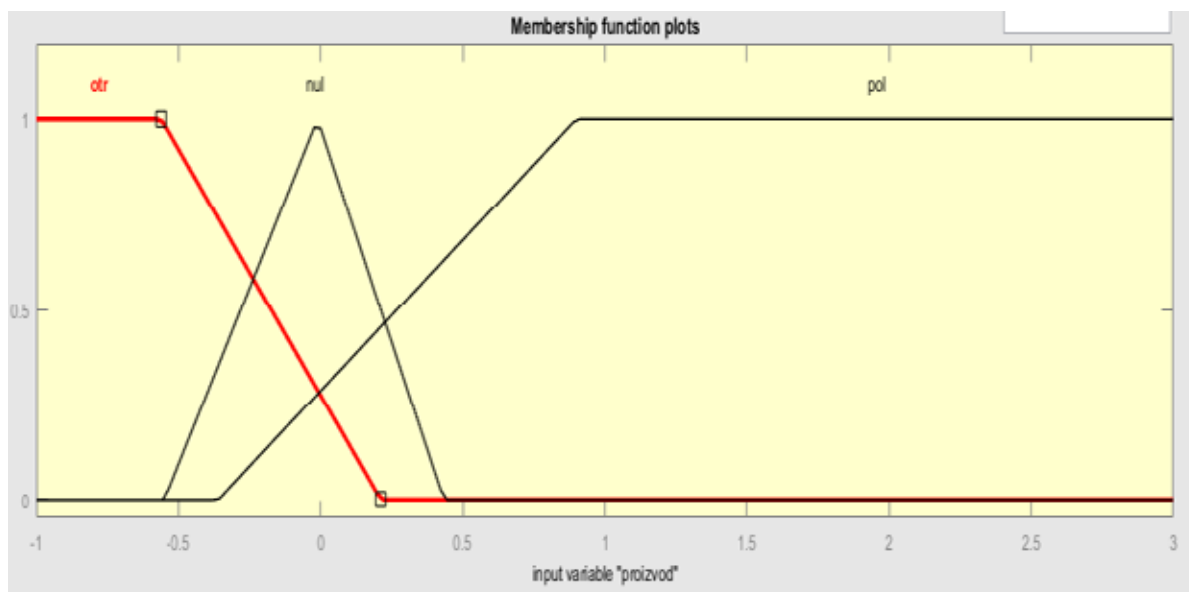


Рис. 5. Функція належності ЛП «похідна помилки»

1. If (oshibka is otr) and (integ is mal) and (proizvod is otr) then (Kp is bol)(Ti is bol)(Kd is bol) (1)
2. If (oshibka is otr) and (integ is sred) and (proizvod is nul) then (Kp is bol)(Ti is sred)(Kd is sred) (1)
3. If (oshibka is otr) and (integ is bol) and (proizvod is nul) then (Kp is bol)(Ti is mal)(Kd is sred) (1)
4. If (oshibka is nul) and (integ is sred) and (proizvod is nul) then (Kp is sred)(Ti is sred)(Kd is sred) (1)
5. If (oshibka is pol) and (integ is bol) and (proizvod is pol) then (Kp is mal)(Ti is mal)(Kd is mal) (1)
6. If (oshibka is pol) and (integ is mal) and (proizvod is pol) then (Kp is mal)(Ti is bol)(Kd is mal) (1)
7. If (oshibka is otr) and (integ is bol) and (proizvod is nul) then (Kp is bol)(Ti is mal)(Kd is sred) (1)

Рис. 6. Фрагмент бази правил

Отримавши нові налаштування, можемо підставити їх у ПІД-регулятор та отримати нові результати регулювання.

**Висновки.** У цьому матеріалі описано нову автоматичну систему регулювання, в якій основну роль відіграє адаптивний нечіткий регулятор. Порівняно з іншими АСР, а саме з АСР зі збурення, АСР із відхилення, комбінованої АСР, ця задумка є новою для такого об'єкта, як компресорна установка для зрідження природного

газу, адже в такому разі сама автоматична система регулювання розраховує, які параметри для ПІД-регулятора можна застосувати, щоб покращити процес регулювання. Таким чином, використання нечітких адаптивних ПІД-регуляторів дозволить ефективно управляти технологічними процесами без їх зупинок, а подальше введення нейрокомп'ютера може привести до самонавченої адаптації з визначення оптимальних параметрів без коригування бази правил.

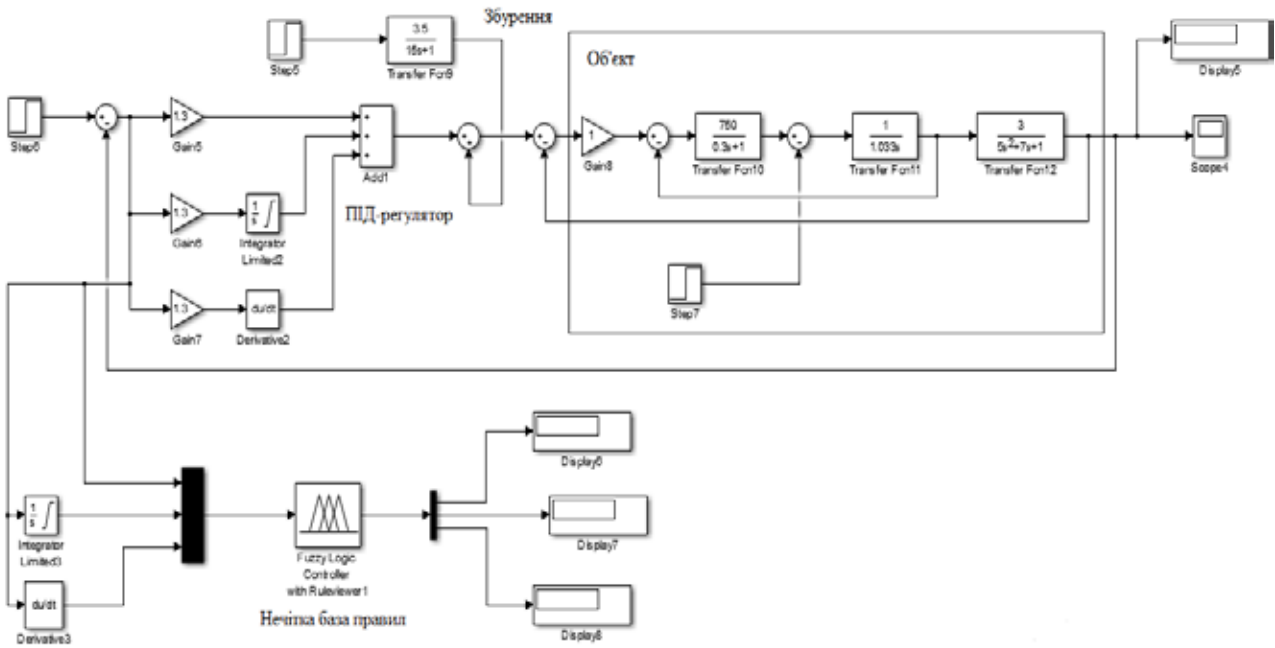


Рис. 7. Експериментальна схема виконана в програмі Simulink

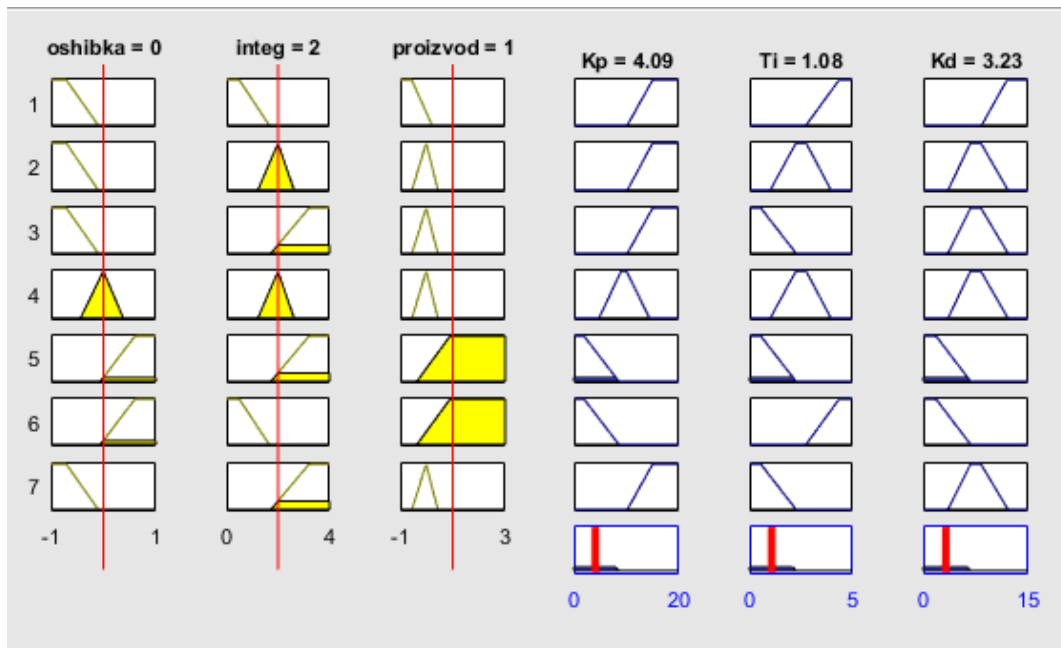


Рис. 8. Результат роботи адаптивного регулятора

**Список літератури:**

1. Шаміна В.А. Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць XII науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 17–20 квітня 2012 р. Донецьк : ДонНТУ, 2012. 305 с.
2. Галеркин Ю.Б., Козаченко Л.И. Турбокомпрессоры: Учебное пособие. Санкт-Петербург : издательство Политехнического университета, 2008, 374 с.
3. Михайленко В.С., Ложечников В.Ф. Методы настройки нечеткого ПИД-регулятора. *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы*. 2013. № 1. С. 12–17.
4. Лошак К.Р, Беглов К.В. Налаштування нечіткого регулятора для автоматичного контролю параметрів у змішувальному баку хімічних речовин. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2019. № 6. С. 105–111.
5. Беглов Я.И., Беглов К.В. Применение нечеткого регулятора для регулирования концентрации жидкого поглотителя в первом контуре АЭС. *Вісник ХНТУ*. 2017. № 3. С. 27–33.

**Vasyliiev M.V. ADJUSTMENT OF FUZZY ADAPTIVE REGULATOR OF COMPRESSOR UNIT FOR LIQUEFACTION OF NATURAL GAS**

*The main properties of the object are studied, as well as the methods by which new parameters can be found for the regulator of the compressor unit for liquefaction of natural gas. The main properties of the adaptive regulator itself are studied, as well as the method by which the work was performed is developed. A comparison was also made with other types of automatic control systems that can be used in this facility. The sequence of construction of the adaptive controller and its interaction with the object is studied. The initial results of the adaptive controller and their comparison with other automatic control systems are investigated. The general properties and rules of construction of the adaptive regulator, the basic subtleties at work with it are studied. New possibilities for regulation of the compressor installation for liquefaction of natural gas are fully considered and the basic rules concerning application of this adaptive regulator are deduced. A study of the effectiveness of the adaptive regulator for this object was conducted and conclusions were made on the work of the regulator and the effectiveness of its results. A special sequence of work was also developed for the construction of an adaptive controller and its application on site. In general, the basic rules for working with such a regulator and its application in a natural gas liquefaction plant are derived. The behavior of the plant is investigated and new settings for the regulation of the natural gas liquefaction plant are derived. The main types of regulation of this object are applied and new rules for finding settings for the main regulator of the compressor unit are derived. The work on comparison of already traditional types of regulation with the adaptive regulator is made and conclusions on application of this or that type of regulation of compressor installation comparing results of regulation are made. The possibility of real use of this regulator on a constant basis in production is investigated, conclusions on the main work of the regulator and also shortcomings which can arise at a choice of regulation with the adaptive regulator are made.*

**Key words:** compressor, liquefaction, natural gas, adaptive regulator, efficiency of adaptive regulator.



**Гарист А.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## АНАЛІЗ ЗАХИЩЕНОСТІ WI-FI МЕРЕЖ

Використання бездротових технологій надає користувачам можливість вільного пересування без втрати зв'язку, операторам мережі – більше можливостей для організації з'єднань і доступу у мережу безлічі нових пристроїв. Сьогодні бездротові Wi-Fi мережі використовуються майже всюди завдяки простоті використання мережі, високій мобільності користувачів і простоті встановлення цієї технології. Ця технологія дедалі частіше стає обов'язковим складником не тільки домашніх, але й корпоративних мереж.

Аналіз захищеності – це процес перевірки інфраструктури організації на наявність можливих вразливостей мережевого периметра, віртуальної інфраструктури, які спричинені помилками конфігурації, програмного забезпечення й вихідного коду додатків. Інакше кажучи, під час аналізу захищеності перевіряється безпека різних інформаційних систем – як внутрішніх, так і зовнішніх.

Стандарт Wi-Fi розроблено на основі IEEE 802.11 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) та використовується для широкопasmових бездротових мереж зв'язку. Від самого початку технологія Wi-Fi була орієнтована на організацію точок швидкого доступу в Інтернет (hotspot) для мобільних користувачів. Переваги бездротового доступу очевидні, а технологія Wi-Fi від самого початку стала стандартом, якого дотримуються виробники мобільних пристроїв. Поступово мережі Wi-Fi стали використовувати малі й великі офіси для організації внутрішніх мереж і підмереж, а оператори – створювати власну інфраструктуру надання бездротового доступу в мережу Інтернет на основі технології Wi-Fi.

Переваги, які бездротові мережі Wi-Fi дають людям, величезні, проте такі мережі несуть із собою й додаткові загрози інформаційної безпеки в разі неправильного їх використання. З погляду безпеки треба враховувати не тільки загрози, які властиві дротовим мережам, але й середовище поширення сигналу. У бездротових мережах отримати доступ до інформації набагато простіше, ніж у дротових мережах, а також вплинути на канал передачі даних.

**Ключові слова:** Wi-Fi мережа, аутентифікація, хендшейк, ідентифікатор, доступ, радіоканал, протокол, адміністратор, трафік, шифрування, сканування, клієнт, точка доступу, хендшейк, Key Reinstallation Attacks.

**Постановка проблеми.** Загроза несанкціонованого доступу до ресурсів корпоративної мережі передачі даних пов'язана з вадами в налаштуваннях безпеки бездротової мережі або появою нелегальної точки доступу до бездротової мережі, яка під'єднана до неї. Зловмисники можуть приєднуватися до бездротової мережі та входити в дротову корпоративну мережу, як і офіційний її користувач, та отримувати доступ до внутрішніх ресурсів через мережу Інтернет. З огляду на це багато компаній були змушені відмовитися від використання бездротових мереж суто з міркувань збереження конфіденційності інформації. Під час побудови мережі бездротового зв'язку, основаної на технології Wi-Fi, напрацьовано різні варіанти побудови стійких до зламу систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У 2017 році було розкрито інформацію про критичні проблеми програми сертифікації бездро-

тового зв'язку WPA2, які дають можливість обійти захист і, як наслідок, прослуховувати трафік Wi-Fi, який курсує між точкою доступу і користувачем. Комплекс вразливостей у WPA2, який отримав назву KRACK (Key Reinstallation Attacks), було виявлено зведеною групою дослідників із різних університетів і компаній. Керівник групи Меті Ванхоф розповів, що йому вдалося знайти проблеми, з яких формується KRACK, ще в 2016 році, проте більш ніж рік він удосконалював свою атаку. Дослідник повідомив про вразливості виробникам і представникам організації US-CERT в липні 2017 року. Виробники обладнання випустили оновлення прошивок, які усувають вразливості, проте залишається велика кількість неоновленого обладнання.

У 2019 році Меті Ванхоф та Еял Ронен знайшли п'ять вад нового стандарту Dragonblood, який є основним механізмом обміну ключами для

аутентифікації користувачів маршрутизатором або точкою доступу з підтримкою програми сертифікації бездротового зв'язку WPA3.

Водночас, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених проблемам захищеності Wi-Fi мережі, стрімкий розвиток систем зв'язку та протоколів їхнього захисту зумовлює потребу подальших досліджень цієї тематики.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз захищеності Wi-Fi мереж і виявлення нелегітимної активності з можливістю блокування несанкціонованих під'єднань до мережі або оповіщення сторонніх засобів фільтрації та блокування трафіку. Метою аналізу є своєчасне виявлення потенційних загроз і реагування на них, не надаючи негативного впливу на функціонування мережі зв'язку.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо актуальні загрози інформації, яка циркулює в бездротовій мережі:

– перехоплення й порушення цілісності конфіденційної інформації, яка передається бездротовими мережами. Зловмисник, який перебуває в зоні дії точок доступу, може перехоплювати радіосигнал, розшифровувати й ретранслювати дані, водночас залишаючись майже непоміченим. Використання антен і підсилювачів дає змогу зловмисникові перебувати на значному віддаленні від цілі в процесі перехоплення;

– порушення доступності інформації, яка циркулює в бездротових мережах. Інформація може бути обмежена як перешкодами в каналі зв'язку, так і атаками зловмисників, які спрямовані на вузли бездротової мережі.

Є також і загрози інформації, яка зберігається на вузлах абонентів бездротової мережі:

– ідентифікаційні дані абонентів бездротової мережі можуть бути як перехоплені під час пересилання по бездротовій мережі, так і отримані зловмисником під час отримання доступу до мобільного станції. Ці дані можуть бути використані для під'єднання до бездротової мережі від імені легального користувача;

– несанкціонований доступ до інформації, що зберігається локально на вузлах мережі, може бути отримано завдяки неправильним налаштуванням безпеки абонента бездротової мережі.

Радіоканал передачі даних, який використовується у Wi-Fi мережах, потенційно схильний до втручання з метою порушення конфіденційності, цілісності й доступності інформації. Під час під'єднання до мережі передбачено аутенти-

фікацію та шифрування, але ці елементи захисту мають свої вади.

Шифрування значно знижує швидкість передачі даних, і найчастіше воно усвідомлено вимикається адміністратором для оптимізації трафіку. Початковий стандарт шифрування WEP (Wired Equivalent Privacy) був дискредитований через вразливості в алгоритмі розподілу ключів RC4 (Rivest Cipher 4). У 2003 році створено стандарт WPA (Wi-Fi Protected Access). Стандарт WPA використовує протокол цілісності тимчасових ключів TKIP (Temporal Key Integrity Protocol). Також у ньому використовується метод контрольної суми MIC (Message Integrity Code), який дає змогу перевіряти цілісність пакетів. У 2004 році створено стандарт WPA2, який являє собою поліпшений WPA. Основна відмінність між WPA і WPA2 полягає в технології шифрування, який поєднує симетричний алгоритм блочного шифрування AES (Advanced Encryption Standard) та TKIP. WPA2 забезпечує більш високий рівень захисту мережі, оскільки TKIP дає змогу створювати ключі завдовжки до 128 біт, а AES – до 256 бітів.

Більшість атак починається з розвідки, під час якої виконуються сканування мережі, збір і аналіз пакетів. Багато службових пакетів у мережі Wi-Fi передається у відкритому вигляді. Водночас украй проблематично з'ясувати, хто легальний користувач, який намагається під'єднатися до мережі, а хто збирає інформацію. Після розвідки ухвалюються рішення про подальші кроки можливої атаки.

Захист мережі за допомогою від'єднання відповіді на ширококомовний запит ідентифікатора бездротової мережі ESSID (Extended Service Set Identification) і приховування назви мережі в службових пакетах Beacon frame є недостатнім, оскільки мережу все одно видно на певному радіоканалі та зловмисник чекає авторизованого під'єднання до мережі, адже водночас у незашифрованому вигляді передається ESSID. На цьому захисний захід втрачає сенс. Деякі системи безперервно розсилають ім'я мережі в ефір, намагаючись під'єднатися. Це також є цікавою атакою, оскільки в такому випадку можна «пересадити» користувача на свою точку доступу й отримувати всю інформацію, яку він передає по мережі.

Можна зменшити схильність розвідці, розмістивши точку доступу так, щоб вона забезпечувала необхідне покриття й це покриття мінімально виходило за контрольовану територію. Потрібно регулювати потужність точки доступу й використовувати спеціальні інструменти для контролю

поширення сигналу. Також можна повністю екранувати приміщення з точкою доступу для повної невидимості мережі ззовні.

Насамперед атакам піддаються некоректно сконфігуровані пристрої, пристрої зі слабкими й не досить довгими ключами шифрування, а також пристрої, які використовують вразливі методи аутентифікації. Велика частина успішних зламів відбувається завдяки неправильним налаштуванням точок доступу та програмного забезпечення.

Найбільш поширеними є два технічних сценарії атак на мережі Wi-Fi – це перехоплення пакетів, які пов'язані з аутентифікацією клієнта (рукоштовання – handshake) з подальшим перебором пароля за словником, і створення підробленої точки доступу з паралельним проведенням атаки «відмови в обслуговуванні» на справжню точку доступу.

Для шифрування переданих даних у мережі Wi-Fi переважно використовується алгоритм WPA2 з від'єднаною технологією WPS. Нині алгоритм WPA2 є найбільш поширеним алгоритмом захисту бездротових мереж.

Найбільш поширена атака на мережу Wi-Fi, захищену протоколами WPA-PSK або WPA2-PSK, – це атака за словником. Протокол захисту WPA-PSK або WPA2-PSK використовує ключ попередньої сесії (PTK – Pairwise Transient Key), який, відповідно, складається з попереднього загального ключа (PSK – Pre-Shared Key) та п'яти інших параметрів, таких як SSID (символьна назва бездротової точки доступу Wi-Fi), Authenticator Nounce (ANounce), Supplicant Nounce (SNounce), Authenticator MAC-address (MAC-адреса точки доступу) та Supplicant MAC-address (MAC-адреса wifi-клієнта). Цей ключ надалі використовує шифрування між точкою доступу та клієнтом. Зловмисник, який прослуховує ефір, може перехопити всі п'ять параметрів, окрім PSK. PSK отримується завдяки використанню паролльної фрази WPA-PSK, яку відправляє користувач разом із SSID. Комбінація цих двох параметрів пересилається за стандартом формування ключа на основі пароля PBKDF2 (Password Based Key Derivation Function), який генерує 256-бітовий загальний ключ. У звичайній WPA-PSK/WPA2-PSK атаці за словником зловмисник може використовувати програмне забезпечення, яке виводить 256-бітний PSK для кожної паролльної фрази й використовувати її з іншими параметрами, які було описано під час створення PTK. PTK буде використовуватися для перевірки контрольної суми (MIC – Message Integrity Check) в одному

з пакетів handshake. Якщо вони збігатимуться, то паролльна фраза в словнику буде правильною. Водночас використовуються вразливості протоколу аутентифікації користувачів – відкрито передачу ANounce, SNounce, MAC-адреси точки доступу і MAC-адреси WiFi-клієнта. Якщо під час відтворення алгоритму аутентифікації відбудеться успішна авторизація користувача, значить обраний зі словника пароль є істинним й атака призвела до успішного злому мережі.

Розгляньмо атаку KRACK, в основі якої лежить вразливість чотирьохелементного хендшейка WPA2. Хендшейк виконується тоді, коли клієнт хоче під'єднатися до захищеної мережі Wi-Fi. У процесі під'єднання підтверджується, що обидва боки (клієнт і точка доступу) мають коректні облікові дані. Одночасно хендшейк використовується для узгодження свіжого ключа шифрування, який буде застосовуватися для захисту трафіку.

Зловмисник може влаштувати атаку типу «людина в середині» (man in the middle) та змусити учасників мережі перевстановити ключі шифрування, які захищають трафік WPA2. До того ж, якщо мережа налаштована на використання WPA-TKIP або GCMP, зловмисник зможе не тільки прослуховувати трафік WPA2, але й змінювати зміст пакетів даних жертви. Під час використання цієї помилки можна здійснювати розкодування трафіку, перехоплювати TCP-з'єднання і багато іншого. Головна умова полягає в тому, що зловмиснику доведеться перебувати в зоні дії мережі Wi-Fi, яка піддається атаці, тобто атаку не можна проводити віддалено.

Також можна відокремити так звані DoS-атаки, які спрямовані на порушення якості функціонування мережі або абсолютне припинення доступу користувачів. У випадку мережі Wi-Fi відстежити джерело, яке перевантажує систему «сміттєвими» пакетами, украй складно – його місце розташування обмежується лише зоною покриття. До того ж є апаратний варіант цієї атаки – це встановлення досить сильного джерела перешкод у потрібному частотному діапазоні.

У 2018 році створено новий стандарт безпеки – WPA3. Творці WPA3 спробували усунути концептуальні недоробки, які впливали з появою атаки KRACK. Оскільки ключова вразливість ховалася в чотирьохелементному рукоштованні, у стандарт WPA3 додалася обов'язкова підтримка більш надійного методу з'єднання – SEA (Simultaneous Authentication of Equals), також відомого як Dragonfly. Технологія SEA основана на протоколі обміну ключами Діффі-Геллмана

з використанням кінцевих циклічних груп. SEA надає інтерактивний метод, відповідно до якого дві й більше сторін встановлюють криптографічні ключі, що засновані на знанні пароля однією або декількома сторонами. Результуючий ключ сесії, який отримує кожна зі сторін для аутентифікації з'єднання, вибирається на основі інформації з пароля, ключів і MAC-адрес обох сторін. Якщо ключ однієї зі сторін виявиться скомпрометованим, це не спричинить компрометації ключа сесії. І навіть дізнавшись пароль, атакуючий не зможе розшифрувати пакети.

Ще одним нововведенням WPA3 є підтримка захисту керівних пакетів PMF (Protected Management Frames) для контролю цілісності трафіку.

Стандарт WPA3 передбачає два режими роботи: WPA3-Personal і WPA3-Enterprise. WPA3-Personal забезпечує надійний захист, особливо якщо користувач задав стійкий пароль, який не можна отримати словниковим перебором. Але якщо пароль не зовсім тривіальний, то має допомогти нове обмеження на кількість спроб аутентифікації в межах одного рукостискання. WPA3-Enterprise забезпечує шифрування на основі 192-розрядних ключів.

Нині стандарт IEEE 802.11 також дає можливість під'єднання до мережі Wi-Fi за допомогою протоколу захисту OWE (Opportunistic Wireless Encryption). Протокол OWE забезпечує безпеку даних, які передаються по незахищеній мережі, шляхом їх шифрування. Водночас від користувачів не потрібно будь-яких додаткових дій і введення паролів для під'єднання до мережі. Атаки, які відбуваються у відкритій мережі, належать до пасивних. Коли до мережі під'єднується багато клієнтів, зловмисник може зібрати дуже багато даних, просто фільтруючи інформацію, яка проходить через нього. Протокол OWE використовує опортуністичне шифрування, щоб захищатися від пасивного підслухування. Воно також запобігає атаці з внесенням пакетів, коли зловмисник намагається порушити роботу мережі, створюючи й передаючи особливі пакети даних, що видаються частиною нормальної роботи мережі.

Проте, незважаючи на переваги та усунуті вади, протокол WPA3 має і два типи вад, яких припустилися під час проєктування. Перший призводить до атак зі зниженням рейтингу, а другий – до витоків бічного кеша. Алгоритм кодування пароля в Dragonfly містить умовні гілки. Якщо зловмисник може визначити, яку гілку ланцюга «if-then-else» було вилучено, він може дізнатися, чи було

знайдено елемент пароля в конкретній ітерації цього алгоритму. В основі атаки по бічному каналу на основі синхронізації лежить атака на метод рукостискання Dragonfly. Цей метод використовує певні мультиплікативні групи, алгоритм кодування пароля використовує змінну кількість ітерацій для кодування пароля. Точна кількість ітерацій залежить від пароля, який використовується, і MAC-адреси точки доступу і клієнта. Зловмисник може виконати віддалену тимчасову атаку на алгоритм кодування пароля, щоби визначити, скільки ітерацій знадобилося для кодування пароля. Відновлена інформація може бути використана для виконання пароліної атаки, яка схожа на автономну атаку за словником.

Незважаючи на розглянуті методи атаки на бездротову мережу, необхідно не забувати й про виток інформації з провідної мережі. Зазвичай бездротові мережі з'єднуються з дротовими. Значить через точку доступу можна атакувати дротову мережу. Якщо є в наявності помилки в налаштуваннях як провідної, так і бездротової мережі, то відкривається багато можливостей для атак. Наприклад, точки доступу, які працюють у режимі моста (Layer 2 Bridge), під'єднані в мережу без маршрутизаторів або з порушенням сегментації й передають у радіоефір широкомовні пакети з дротової частини мережі (ARP-запити, DHCP, кадри STP і д.р.).

**Висновки.** Отже, можна виділити основні рекомендації із забезпечення безпеки бездротових Wi-Fi мереж:

- для забезпечення безпеки даних, які передаються по бездротовій мережі, необхідно використовувати шифрування WPA2/WPA3 зі стійким паролем;

- не під'єднуватися до відкритих Wi-Fi мереж. Ці мережі можуть прослуховуватися або навіть повністю контролюватися зловмисниками. За нагальної потреби під'єднання до такої мережі необхідно використовувати VPN-з'єднання.

З огляду на вищевикладене для захисту Wi-Fi мереж потрібно впроваджувати комплексний підхід до забезпечення інформаційної безпеки. Необхідно приділяти увагу підвищенню обізнаності співробітників у питаннях інформаційної безпеки та перекривати потенційні вектори атак на мережу. Впроваджувати безпечні методи аутентифікації з перевіркою сертифікатів, обмежувати доступ клієнтів гостьової мережі до локальної обчислювальної мережі, проводити регулярний аналіз захищеності бездротових мереж, виявляти й від'єднувати несанкціоновані точки доступу.

**Список літератури:**

1. Mathy Vanhoef, Key Reinstallion Attacks. Breaking WPA2 by forcing nonce reuse. URL: <http://www.krackattacks.com>.
2. Mathy Vanhoef, Eyal Ronen, Dragonblood. Analysing WPA3's Dragonfly Handshake. URL: <http://wpa3.mathyvanhoef.com>.
3. Stewart S. Miller, Wi-Fi Security –McGraw-Hill Networking Professional Publishing, 2003, 309 p.

**Haryst A.V. WI-FI NETWORK SECURITY ANALYSIS**

*The use of wireless technologies allows users to move freely without losing communications, and network operators have more opportunities to establish connections, and create many new devices to access the network. Today, wireless Wi-Fi networks are used almost everywhere due to the ease of use, high user mobility and ease of installation of this technology. This technology is increasingly becoming a mandatory component of not only home, but also corporate networks.*

*Security analysis is the process of checking an organization's infrastructure for possible vulnerabilities in the network perimeter, virtual infrastructure, caused by configuration errors, as well as software and application source code. In other words, the security analysis checks the security of various information systems, both internal and external.*

*The Wi-Fi standard is developed based on IEEE 802.11 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) and is used for broadband wireless communication networks. Initially, Wi-Fi technology was focused on organizing hotspots for mobile users. The superiority of wireless access is clear, and Wi-Fi technology has become the standard followed by mobile device manufacturers. Gradually, small and large offices began to use Wi-Fi networks to organize internal networks and subnets, and operators to create their own infrastructure for providing wireless Internet access based on Wi-Fi technology.*

*The advantages that Wi-Fi wireless networks bring to people are enormous, but such networks also pose additional threats to information security if they are misused. From a security point of view, it is necessary to consider not only the threats that are inherent in wired networks, but also the middle of the signal transmission. It is much easier to access information in wireless networks than in wired networks, and also to influence the data transmission channel.*

**Key words:** *Wi-Fi network, authentication, handshake, identifier, access, radio channel, protocol, administrator, traffic, encryption, scanning, client, access point, handshake, Key Reinstallation Attacks.*

**Глухова Н.В.**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

**Пісоцька Л.А.**

Дніпровський державний медичний університет

## СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЯСКРАВОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПІД ЧАС ФОРМУВАННЯ ГАЗОВИХ РОЗРЯДІВ

*У статті розглянуто сучасний стан досліджень, які ґрунтуються на використанні зображень. Показано переваги та огріхи методів медичної діагностики, які передбачають реєстрацію та подальший аналіз зображень. Серед огріхів використання зображень під час виконання діагностичних процедур виділено такі: необхідність встановлення інформативних ознак зображень, наявність суб'єктивного вкладу в діагностичні рішення під час аналізу зображень людиною-експертом. Для розв'язання вказаних огріхів запропоновано спосіб виявлення й аналізу інформативних ознак зображень на основі статистичного підходу.*

*Надано огляд фізичних явищ, які виникають під час процедури реєстрації зображень газорозрядного випромінювання. Газовий розряд формується навколо досліджуваного об'єкта завдяки впливу генератора, який створює імпульсне електромагнітне поле. Завдяки генератору зовнішнього електромагнітного поля навколо досліджуваного об'єкта виникає область іонізованого газу, частинки якого взаємодіють між собою та об'єктом. Частинки, що перебувають у збудженому стані, зіштовхуються, розпадаються та можуть переходити на більш низькі рівні, що супроводжується випромінюванням світла, зокрема в ультрафіолетовому діапазоні.*

*Взаємодія та перетворення часток є джерелом походження випадкових ефектів, які проявляються в ймовірнісному характері формування газорозрядних треків, та потребують врахування під час обробки зображень із використанням методів математичної статистики й теорії ймовірності.*

*З метою реалізації секторного способу аналізу газорозрядного випромінювання розроблено методику оцінки параметрів для профілю яскравості зображення. Запропоновано використання як інформативного параметра для сектору зображення відносної яскравості. Для отримання кількісних значень точкових статистичних оцінок розраховано середнє арифметичне значення та стандартне відхилення в межах контрольної групи. Отримані результати розрахунків показали незначний розкид статистичних параметрів у межах груп.*

**Ключові слова:** *аналіз даних, газорозрядне випромінювання, цифрова обробка зображень, профіль яскравості.*

**Постановка проблеми.** У сучасній медичній діагностиці широко застосовуються зображення. Способи отримання зображень, що засновані на певних вимірювальних процедурах, дуже різноманітні. Порівняно з іншими способами вимірювань, які передбачають кількісну оцінку окремих параметрів, методи досліджень, що ґрунтуються на отриманні зображень, потенційно здатні забезпечити дослідника значно більшою кількістю інформації. З іншого боку, під час залучення зображень у процесі реалізації діагностичних процедур виникає необхідність їх грамотного аналізу та інтерпретації. Вказані процедури може виконувати кваліфікований фахівець певної галузі (експерт), але для мінімізації суб'єктивних факторів та отримання більш точних кількісних

оцінок інформативних складників зображень раціонально скористатися сучасними засобами комп'ютерної техніки.

Незважаючи на значну кількість прикладних програм, орієнтованих на обробку й аналіз зображень, вони передусім спрямовані на розв'язання типових завдань, наприклад поліпшення зображень, ідентифікацію обличчя тощо. Що стосується галузі медичної діагностики, то нині не запропоновано універсальних процедур і методів обробки зображень, оскільки візуальна інформація в медичній діагностиці реєструється дуже різними способами (ультразвукова діагностика, томографія, рентгенівське випромінювання тощо). Зображення, які отримано в результаті вимірювальних процедур, що базуються на принципово різних

фізичних явищах та ефектах, не можуть аналізуватися загальними стандартними процедурами, а тому потребують розроблення відповідних алгоритмів і прикладного програмного забезпечення, що враховує специфіку їх отримання та мету досліджень.

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

Двовимірне або тривимірне зображення можна охарактеризувати інформативними ознаками. Нетривіальність процедури аналізу зображень полягає саме у встановленні такого роду інформативних ознак. Сукупність фотометричних параметрів зображень можна поділити на дві великі групи: 1) геометричні ознаки; 2) яскравісні ознаки [1]. У роботі увагу зосереджено на аналізі зображень газорозрядного випромінювання, які застосовуються в галузі медичної діагностики [2-4]. Виявлення інформативних ознак газорозрядного світіння навколо фаланг пальців людини застосовується з метою дослідження функціонального стану організму. Водночас під час аналізу картини світіння навколо пальця необхідно обов'язково враховувати ймовірнісний характер формування газових розрядів [5: 6]. Розряди виникають навколо досліджуваного об'єкта шляхом впливу зовнішнього електромагнітного поля. Газовий розряд являє собою один із різновидів плазми. Завдяки генератору зовнішнього імпульсного електромагнітного поля навколо досліджуваного об'єкту виникає область іонізованого газу. Він містить приблизно однакову концентрацію як позитивних, так і негативних заряджених часток, а також певну кількість нейтральних часток. Для виникнення та існування газового розряду необхідно забезпечення різниці потенціалів завдяки дії високовольтного генератора (у цьому випадку генератора імпульсної напруги).

Завдяки різниці потенціалів на обкладинках генератора з аноду випускаються електрони. Їхній рух прискорюється катодом, завдяки чому вони починають зіштовхуватися з молекулами й атомами газу з навколишнього повітря. Збудження частинок навколишнього повітря, а також досліджуваного об'єкта забезпечується завдяки наявності зіштовхування частинок між собою. Частинки, що перебувають у збудженому стані, можуть розпадатися та переходити на більш низькі рівні, що супроводжується випромінюванням світла, зокрема в ультрафіолетовому діапазоні.

Описані фізичні процеси, що утворюють джерело випромінювання світла з різною довжиною хвиль, зумовлюють специфічне випромінювання

в середовищі газорозрядної плазми, що також має назву тліючого розряду [7]. Водночас у роботі [7] наголошується, що процеси, пов'язані з утворенням плазми, можуть використовуватися для дослідження як електромагнітних, так і квантових явищ. Завдяки цьому метод газорозрядного випромінювання є універсальним інструментом, який успішно застосовується як під час дослідження в галузі медичної діагностики [8], так і під час встановлення біологічних властивостей води, які корелюють із квантовими ефектами, насамперед з утворенням когерентних доменів у структурі води [9–12].

**Постановка завдання.** Навіть стислий огляд фізичних явищ, які відбуваються під час процесу газорозрядного випромінювання, надає підстави для розглядання цього процесу як випадкового, що ґрунтується на ймовірнісній природі утворення та зіштовхування заряджених часток. Це дає підґрунтя розглядати сигнали та процеси під час газорозрядного випромінювання як складні явища, що містять регулярні та випадкові складники. Регулярний складник залежить від параметрів пристрою реєстрації та характеристик досліджуваного об'єкта. Випадковий зумовлений ймовірнісною природою газового розряду.

Завданням наукових досліджень у роботі є розроблення статистичних методів для аналізу зображень газорозрядного випромінювання, які дають змогу врахувати ймовірнісний характер фізичного процесу формування розряду та одночасно виділити інформативні ознаки зображень, пов'язані з характеристиками об'єкта досліджень. Увагу насамперед зосереджено на дослідженні яскравісних (фотометричних) ознак зображень випромінювання.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Метод газорозрядного випромінювання використовується для виявлення порушень функціонування різноманітних систем та органів людини, а також виявлення проявів психоемоційних факторів під час медичних діагностичних процедур [4]. Особливо ефективним цей метод виявився під час дослідження причин виникнення різноманітних неінфекційних захворювань людини на ранніх стадіях. Відомо, що профілактика та виявлення захворювань на ранніх стадіях суттєво підвищують ймовірність швидкого одужання без тривалих наслідків.

Різнманітні процеси в організмі людини пов'язані з електромагнітними явищами. Зокрема, спотворення фізичних характеристик мембран живих клітин призводить до коливань електро-

магнітних властивостей клітини. Метод газорозрядного випромінювання забезпечує можливість ранньої діагностики та ґрунтується на отриманні зображень газорозрядного випромінювання навколо пальців людини. Згідно з методикою, розробленою професором П. Манделом [13], на базі аналізу особливостей випромінювання може бути проведено комплексну діагностику всього організму людини.

Однак огріхом цього методу є його залежність від імовірнісної природи газового розряду, що зумовлює необхідність статистичної обробки результатів вимірювань.

З метою статистичного аналізу результатів досліджень методом газорозрядного випромінювання на першому етапі повинен бути виділений набір інформативних ознак зображень, представлених у кількісній формі. Інформативні ознаки повинні бути пов'язані з певними характеристиками об'єкта досліджень. Під час розв'язання завдання встановлення біологічних властивостей води було розроблено спосіб на основі побудови гістограм яскравості зображень [14], але для медичної діагностики він не може бути впроваджений, оскільки не дає можливості аналізу зображень в окремих секторах.

Оскільки метод газорозрядного випромінювання оснований на реєстрації зображень, то його результати ґрунтуються переважно на порівняльних характеристиках зображень для

різних досліджуваних груп. З метою виявлення можливих порушень у структурі випромінювання як на основі експертного аналізу, так і на основі систем підтримки ухвалення діагностичних рішень, необхідне формування так званої контрольної групи майже здорових людей, показники газорозрядного випромінювання для яких на основі експертної думки можна віднести до нормального типу випромінювання, без істотних порушень.

Методика, розроблена професором П. Манделом, передбачає аналіз параметрів випромінювання в певних секторах радіального зображення випромінювання навколо пальців: певному сектору зображення ставиться у відповідність конкретний орган або система. Тому в розробленій прикладній програмі для аналізу зображень вони поділяються на декілька секторів (рис. 1). Представлене на рис. 1 зображення є негативним, зафіксованим на рентгенівській плівці. Для кожного сектору розраховується ширина газорозрядної корони, яка складається із сукупності зафіксованих газорозрядних треків. Як було встановлено під час експертного аналізу, для проведення діагностичних процедур важливими є не тільки геометричні розміри зображення газорозрядного випромінювання, але і його фотометричні ознаки, зокрема яскравість. Тому до складу розробленого прикладного програмного забезпечення включено алгоритми, які дають змогу проводити кількісну

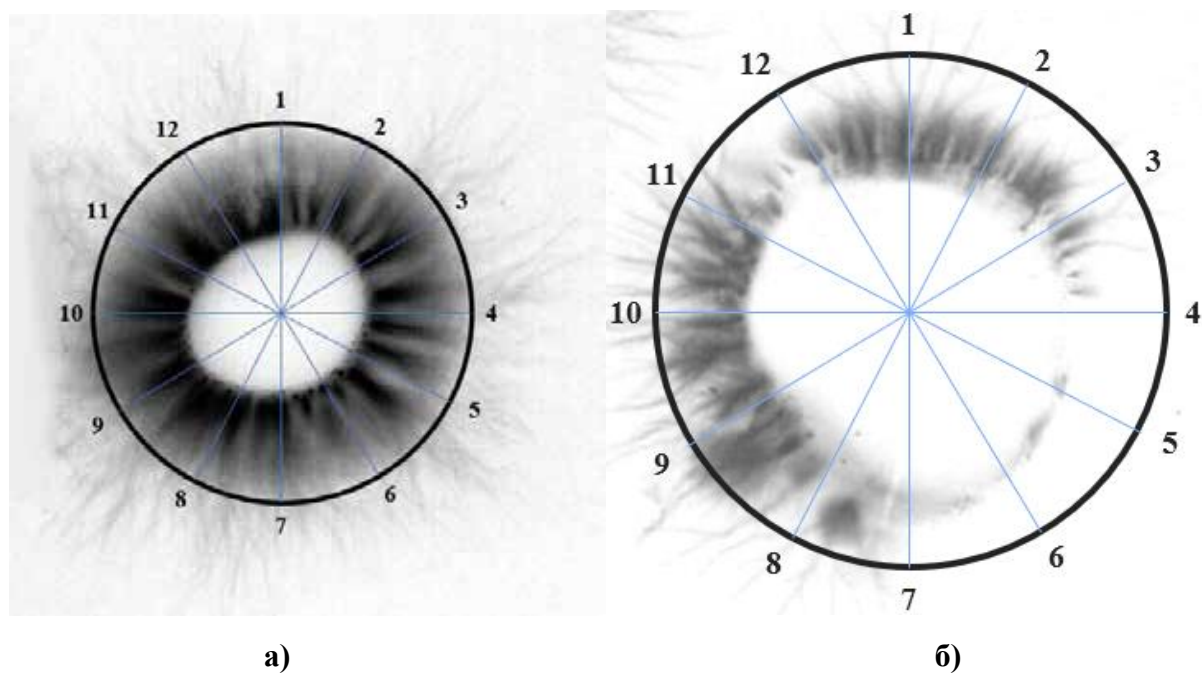


Рис. 1. Сектори для аналізу параметрів зображення газорозрядного випромінювання (а – нормальний тип випромінювання; б – випромінювання з порушеннями структури)



оцінку показників яскравості випромінювання для виділених секторів зображення [15].

Для відповідного сектору формується вектор, який містить значення яскравості пікселів:

$$\bar{b} = [b_1, b_2, \dots, b_k].$$

Для кожного вектора розраховується відносна яскравість випромінювання:

$$\hat{b} = \frac{b_{\min}}{b_{\max}},$$

де  $b_{\min}$ ,  $b_{\max}$  – відповідно мінімальна та максимальна яскравості для профілю яскравості для цього сектору.

З метою статистичного аналізу фотометричних ознак для вибірки зображень, отриманої для контрольної групи майже здорових людей, для оцінки найбільш імовірного значення відносної яскравості використовувалось середнє арифметичне значення. Обсяг контрольної групи під час досліджень  $n=68$  зображень.

Середнє арифметичне значення відносної яскравості випромінювання спочатку розраховувалось для 12 виділених секторів одного пальця:

$$\hat{b}_i^{cep} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \hat{b}_j,$$

де  $k$  – кількість секторів;  $i$  – номер пальця.

Методика та відповідне програмне забезпечення передбачали можливість розрахунку середнього арифметичного як для одного, так і для кількох пальців людини. В останньому випадку отримання усередненої оцінки відбувалося аналогічним чином, але для декількох пальців. У такий спосіб було отримано 68 значень середньої яскравості випромінювання для кожного представника з контрольної групи. Для кожного з них цей показник було взято за норму.

З метою формування усереднених показників для контрольної групи загалом і для їхнього статистичного аналізу було розраховано такі кількісні характеристики:

1. Мінімальне значення середньої яскравості в межах контрольної групи:

$$\hat{b}_{\min} = \text{MIN}[\hat{b}_z] = 0,29,$$

$z = 1, 2, \dots, n$  – номер представника контрольної групи.

2. Максимальне значення середньої яскравості в межах контрольної групи:

$$\hat{b}_{\max} = \text{MAX}[\hat{b}_z] = 0,48,$$

$z = 1, 2, \dots, n$  – номер представника контрольної групи.

3. Середнє арифметичне значення відносної яскравості загалом по групі:

$$\hat{b}_{cep} = \frac{1}{n} \sum_{z=1}^n \hat{b}_z = 0,37.$$

4. Стандартне відхилення:

$$\sigma(\hat{b}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{z=1}^n \hat{b}_z^2} = 0,004.$$

Завершальний етап статистичного аналізу кількісних параметрів для контрольної групи зображень із метрологічного погляду повинен містити оцінку сумарної (комбінованої) невизначеності вимірювань.

За будь-якого виду та методу вимірювань сумарна невизначеність завжди містить декілька складників, зумовлених впливом різноманітних факторів під час реалізації вимірювальної процедури. У цьому випадку сумарна невизначеність буде містити такі складники:

1) Компоненти типу А, зумовлені впливом випадкових факторів:

а) випадкові коливання властивостей об'єкта вимірювань;

б) вплив навколишнього середовища (неінформативний складник);

в) нестабільність параметрів вимірювальної апаратури, зокрема коливання напруги на вході генератора імпульсного електромагнітного поля тощо.

2) Компоненти типу В, зумовлені дією систематичних впливаючих факторів:

а) недосконалість вимірювальної та реєструвальної апаратури;

б) обмеження за роздільною здатністю та чутливістю аналого-цифрового перетворення зображень;

в) недосконалість алгоритмів і програмного забезпечення для виділення та опрацювання кількісних параметрів зображень.

Оскільки отримані кількісні оцінки статистичних характеристик ґрунтуються на результатах експериментальних досліджень, то вони містять у своєму складі всі перелічені компоненти. Тому значення розрахованого стандартного відхилення є оцінкою стандартної комбінованої невизначеності.

**Висновки.** У статті запропоновано методику статистичного аналізу параметрів яскравості під час формування газових розрядів, яка враховує ймовірнісний характер утворення на фотоматеріалі газорозрядних треків. Виконаний аналіз фізичних процесів, які відбуваються під час практичної реалізації методу газорозрядного випромінювання, показав необхідність врахування

їхньої ймовірнісної природи під час обробки експериментальних даних. Експериментальні результати, отримані під час реєстрації та опрацювання результатів дослідження зображень газо-

розрядного випромінювання контрольної групи з нормальним типом випромінювання, свідчать про незначний розкид статистичних параметрів у межах групи.

#### Список літератури:

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва, 2005. 1072 с.
2. Мінцер О.П., Пісоцька Л.А., Глухова Н.В. Основні напрями прикладної кірліанографії в екології та медицині. *Медицина інформатика та інженерія*. 2020. № 2 (50). С. 96–110.
3. Глухова Н.В. Параметризація зображень газорозрядного излучения с целью выявления нарушенной симметрии. *Scientific achievements of modern society: abstracts of the 5<sup>th</sup> International scientific and practical conference (8–10 января 2020 г.)*. Ливерпуль, Великобритания, 2020. С. 412–416. URL: <https://sci-conf.com.ua/v-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferenciya-scientific-achievements-of-modern-society-8-10-yanvarya-2020-goda-liverpul-velikobritaniya-arhiv/> (дата звернення: 15.03.2021).
4. Глухова Н.В., Пісоцька Л.А. Автоматизована ідентифікація проявів психоемоційної лабільності на зображеннях газорозрядного випромінювання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Т. 30 (69). № 5. Ч. 1. С. 69–74. DOI: 10.32838/2663-5941/2019.5-1/11.
5. Коротков К.Г. Исследование физических процессов, протекающих при газоразрядной визуализации объектов различной природы : автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Ленинград, 1982. 25 с.
6. Yuri P. Raizer. *Gas Discharge Physics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991. 449 p.
7. Stephanie A. Wissel, Zwicker A. The use of DC glow discharges as undergraduate educational tools. *American Journal of Physics*. 2013. № 81(9). P. 663–669. DOI: 10.1119/1.4811435.
8. Pesotskaya L., Glukhova N., Evdokimenko N., Zukow W. Evaluation of biological effects of water on the human body to change the ergo-informational status. *Journal of Education, Health and Sport. Open Journal Systems of Kazimierz Wielki University in Bydgoszcz, Poland*. 2016. № 6(9). P. 736–756. DOI: 10.5281/zenodo.159223.
9. Спосіб визначення ступеня когерентності стану води: пат. 01841 Україна: МПК G 01N 21/00, № 112809; заявл. 02.03.15; опубл. 12.09.16, Бюл. № 17. 8 с.
10. Глухова Н.В. Розробка методу експрес-оцінки біологічних властивостей води. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2014. № 6/5(72). С. 18–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31546.
11. Глухова Н.В., Пісоцька Л.А. Метод визначення ступеня когерентності води з використанням методології фліккер-шумової спектроскопії. *Системи обробки інформації*. 2015. № 5 (130). С. 167–171.
12. Глухова Н.В., Пісоцька Л.А., Кучук Н.Г. Метод оцінки біологічних та квантових властивостей води. *Системи обробки інформації*. 2015. № 7 (132). С. 195–200.
13. Mandel P. *Energetische Terminalpunkt-Diagnose*. Engan, 1983. 199 p.
14. Глухова Н.В. Виявлення інформативних ознак зображень на базі аналізу гістограм яскравості. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Т. 31 (70). № 4. С. 75–80. DOI: 10.32838/2663-5941/2020.4/10.
15. Glukhova N.V. Method for Determining the Measurement Uncertainty of the Detailing Coefficients of the Wavelet Transform of Image Brightness Profiles. *Measurement Techniques*. 2020. № 63 (2). P. 177–183. DOI: 10.1007/s11018-020-01769-1.

#### **Hlukhova N.V., Pisotska L.A. STATISTICAL ANALYSIS OF RADIATION BRIGHTNESS PARAMETERS DURING THE FORMATION OF GAS DISCHARGES**

*The article considers the current state of research based on the use of images. The advantages and disadvantages of medical diagnostic methods, which include registration and further analysis of images, are shown. Among the disadvantages of using images in the implementation of diagnostic procedures are the following: the need to establish informative features of the images, the presence of a subjective contribution to diagnostic solutions in the analysis of images by an expert. To address these shortcomings, a method of identifying and analyzing informative features of images based on a statistical approach is proposed.*

*An overview of physical phenomena that occur during the procedure of registration of images of gas-discharge radiation is given. The gas discharge is formed around the object under study due to the influence of the generator, which generates a pulsed electromagnetic field. Thanks to the generator of the external electromagnetic field around the object under study there is a region of ionized gas, the particles of which interact with each other and the object. Particles that are excited collide, decay, and can move to lower levels, which is accompanied by light radiation, including in the ultraviolet range.*

*The interaction and transformation of particles are a source of random effects, which are manifested in the probabilistic nature of the formation of gas-discharge tracks, and need to be taken into account when processing images using methods of mathematical statistics and probability theory.*

*In order to implement the sector method of gas-discharge radiation analysis, a method for estimating the parameters for the image brightness profile has been developed. The use of relative brightness as an informative parameter for the image sector is proposed. To obtain quantitative values of point statistical estimates, the arithmetic mean and standard deviation within the control group were calculated. The obtained results of calculations showed a slight variation of statistical parameters within the group.*

**Key words:** *data analysis, gas discharge radiation, digital image processing, brightness profile.*

**Гостіщев В.О.**

Державний університет «Одеська політехніка»

**Максимов М.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОДОГРІЙНИМ КОТЛОМ

*У статті детально вивчено, що собою являє такий об'єкт, як водогрійний котел, і вивчено його основні властивості, які допоможуть побудувати автоматичну систему керування. Також було досліджено основні параметри цього об'єкта, які можливо регулювати та які з них являють собою збурення на цей об'єкт. Було виведено основні параметри для контролю за цим об'єктом і можливі збурення, які можуть впливати на процеси регулювання. Вивчено, який саме закон регулювання треба застосовувати для автоматичної системи керування та який саме регулятор потрібно застосовувати для цієї системи. Проведено детально дослідження автоматичної системи керування та вивчено її стійкість до збурення. Наведено графіки для більш ефективного вивчення цієї автоматичної системи керування та зроблено висновки на основі експерименту над цією системою керування. Пояснено, чи справді ця система виконує свою роботу, та наведено основні тези для закріплення теорії про стійкість цієї системи до збурень.*

**Ключові слова:** водогрійний котел, нагрівання води, математична модель, котел, температура води.

**Постановка проблеми.** Оскільки сам водогрійний котел являє собою об'єкт, який уже більш детально вивчено, то він потребує нових рішень у сфері автоматичного керування. Саме тому публікацію спрямовано на знаходження нових методів регулювання температури води на виході з водогрійного котла й насамперед оптимізації цього процесу та мінімізації витрат на цей процес. Саме для цього й було проведено детально дослідження, яке може допомогти оптимізувати процес керування об'єктом та зменшення часу на регулювання й витрату палива для нагрівання води.

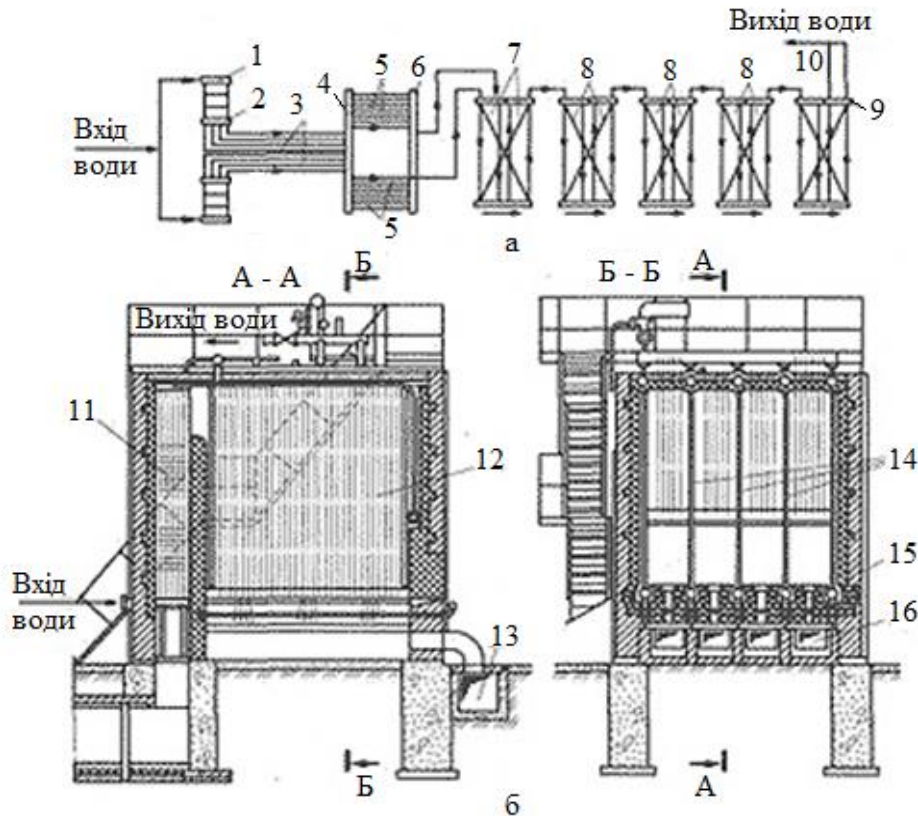
**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показав, що сам об'єкт уже більш детально вивчено. Також описано й основні системи автоматичного керування, які можливо застосовувати для водогрійного котла, та вказано майбутні перспективи для вдосконалення автоматичних систем, які приведуть як до оптимізації самого процесу регулювання, так і до витрати для цього процесу ресурсів. Вивчені публікації показали, що нині є перспективи в майбутньому вивчати нові системи автоматичного керування, які поліпшать роботу водогрійного котла та оптимізують основні параметри регулювання, зокрема й витрати палива.

Було вивчено публікації таких авторів: Р.Д. Ахметжанов, Є.Ф. Бузніков, А.Н. Рибальов та інших.

**Постановка завдання.** Мета статті – дослідити автоматичну систему регулювання водогрійним котлом.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Спочатку все-таки ми перш за все згадаємо, навіщо ж узагалі потрібен нам такий об'єкт, як водогрійний котел. Водогрійний котел – це пристрій, призначений для отримання гарячої води завдяки теплу, що виділяється під час спалювання палива. Теплофікаційний водотрубний газовий водогрійний котел ТВГ-8М – це прямооточний секційний теплогенератор із примусовою циркуляцією води, обладнаний окремим димососом і вентилятором. Схему водогрійного котла ТВГ-8М зображено на рисунку 1.

Котел ТВГ-8М має в наявності подові дифузійні пальники (4 шт.). Повітря до них подають дутьєвим вентилятором ДВ (без примусової подачі повітря до пальників котли задовільно працюють за навантажень до 40 % номін.). Пальники встановлюють у відсіках котла між двосвітними екранами, кожен із пальників має два ряди отворів, діаметром 1,5 мм, розташованих у шаховому порядку. Горюча суміш, яка утворюється в пальнику, запалюється й віддає тепло в топку. У результаті процесу горіння утворюються газоподібні продукти – димові гази. Вони надходять у конвективний газохід через отвір заввишки



**Рис. 1. Водогрійний котел ТВГ-8М**

*а – схема циркуляції води; б – будова котла; 1, 2 – нижні і верхні колектори конвективної поверхні; 3, 5 – сталеві фронтальні труби; 4, 6 – нижній і верхній колектори сталевих екранів; 7 – лівий боковий екран; 8, 14 – двосвітні екрани; 9 – правий боковий екран; 10 – вихід води в тепломережу; 11 – конвективна поверхня нагріву; 12 – радіаційна поверхня топки; 13 – повітряний канал; 15 – пальник; 16 – підпдові канали.*

800 мм над розділовою стінкою, а потім димосос ДС викидає їх в атмосферу. Температура газів, що відходять за котлом, становить 190–210 °С.

Під час спалювання газового палива необхідно забезпечити: гарне попереднє перемішування газу з повітрям, ведення процесу з малими надлишками повітря, поділ потоку суміші на окремі струмені. Підігрів газоповітряної суміші й хімічна реакція горіння мають дуже швидкий перебіг. Основним фактором тривалості горіння є час, витрачений на перемішування газу з повітрям у пальнику. Від швидкості та якості перемішування газу з необхідною кількістю повітря залежать швидкість і повнота згоряння газу, довжина факела топки й температура полум'я. Для процесу горіння димососом створюється необхідне розрядження й забезпечується повне видалення продуктів згоряння. Якщо досягти співвідношення витрати повітря відповідно до подачі палива, процес спалювання буде здійснюватися з максимальною економічністю.

Для зменшення інтенсивності зовнішньої корозії труб водогрійних котлів необхідно підтримувати температуру води на вході в котли

вищою за температуру точки роси димових газів. Мінімально допустима температура води на вході в котли під час роботи на природному газі дорівнює 70 °С. Для забезпечення цього необхідно подавати деяку кількість гарячої води, що вийшла з водогрійних котлів, знову на вхід у котел для змішування з водою зі зворотного трубопроводу й подпиточною водою. Лінію, якою перекачують нагріту воду з виходу котла на його вхід, так само як і спеціальний насос РН, називають рециркуляційною.

Наявність ліній рециркуляції та перепуску води призводить до специфічних режимів роботи водогрійних котлів. Водогрійні котли надійно працюють лише за умови підтримання сталої кількості води, що проходить через них. З іншого боку, за якісного регулювання теплоспоживання в стаціонарному режимі потрібна сталість витрати теплоносія в тепловій мережі, сталість різниці тисків у прямому та зворотному трубопроводах у споживача для реалізації проектних гідравлічних налаштувань теплоспоживання. Ручне налаштування операторами перерахованих вище контурів регулювання за допомогою звичайних засувок без

засобів автоматизації, регуляторів не призводять до економічно виправданих результатів.

У котельні одночасно зазвичай працюють два котли, тому доцільно використовувати каскадно-пов'язане регулювання з головним регулятором. Він сприймає зміну температури зовнішнього повітря й температури прямої води, тобто в загальному колекторі. Впливає головний регулятор на регулятори палива всіх котлів. Окрім того, на регулятор палива подається сигнал від датчика температури води на виході з котла й від датчика температури зворотної води. Отже, подача палива змінюється залежно від температури зовнішнього повітря, температури в загальному колекторі, температури води за котлом і температури зворотної води.

Повітря повинне подаватися в такій кількості, щоб забезпечити повне спалювання палива. Якщо повітря не досить, то, крім неповноти спалювання, буде ще й забруднення атмосфери. Якщо повітря буде надлишок, то буде винесення тепла в трубу. Отже, потрібно регулювати співвідношення паливо – повітря.

Паливо може йти різної якості, і розрахунковий коефіцієнт співвідношення може виявитися не оптимальним. Для підвищення якості необхідно контролювати повноту спалювання палива за вмістом кисню в димових газах. Тож регулятор повітря буде змінювати подачу повітря залежно від розходу палива, витрати повітря, з корекцією за вмістом кисню в димових газах.

Для процесу горіння в топці має бути створено розрідження, якщо воно буде недостатнім, то можливе згасання полум'я. Якщо занадто велике – то відрив полум'я від пальника. Розрідження регулюється залежно від витрати повітря, зміною продуктивності димососа.

Детально все-таки розібравши такий об'єкт, як водогрійний котел, ми перейдімо до основної частини, яка пов'язана зі створенням автоматичної системи керування. І насамперед нам треба дослідити, які ж усе-таки керівні впливи є в цього об'єкта. Для цього ми побудуємо параметричну схему, яка нам і дасть це зрозуміти, оскільки ця схема показує основні канали регулювання, а також збурення, які можуть наноситися на цей об'єкт. Параметричну схему зображено на рисунку 2.

Зважаючи на цю параметричну схему, ми дізнаємося, що керівними величинами є  $F_v$  – витрата газу ( $\text{м}^3/\text{год}$ ),  $F_g$  – витрата повітря ( $\text{м}^3/\text{год}$ ),  $T$  – температура води ( $^{\circ}\text{C}$ ). Збуренням у нас є  $T_{н.в.}$  – температура води в певний момент ( $^{\circ}\text{C}$ ) [1, с. 5].

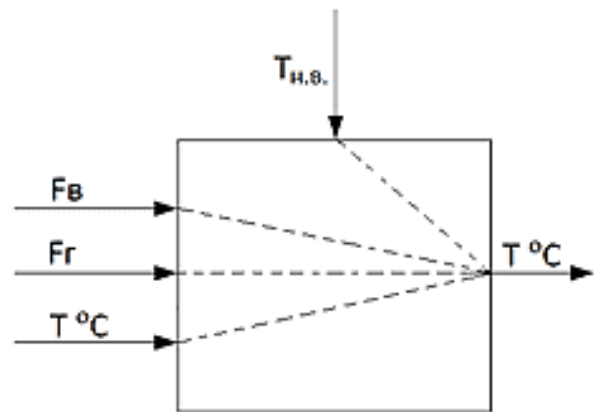


Рис. 2. Параметрична схема водогрійного котла

На підставі виконаного раніше аналізу особливостей застосовуваного водогрійного котла як об'єкта автоматизації, а також беручи до уваги концепцію побудови системи автоматичного керування, розроблено структурну схему системи автоматичного керування водогрійним котлом, яку зображено на рисунку 3.

Об'єкт регулювання САУ – водогрійний котел, його вихідний параметр – температура води на виході з котла, яка змінюється залежно від зміни температури зовнішнього повітря, температури зворотної мережної води й витрати газу, що подається. Кількість (витрата) повітря, що подається в топку котла, визначає економічність процесу горіння та пов'язана з витратою газу, що подається через коефіцієнт співвідношення газ – повітря –  $K_c$ . Збурюючими впливами є зміна зовнішньої температури повітря й температури зворотної мережної води [1, с. 8].

Розробивши структурну схему автоматичного керування, можна взятися до моделювання самої моделі котла та її системи керування в середовищі Simulink. Отриману схему зображено на рисунку 4.

Як типовий регулятор вибираємо ПІД-регулятор, оскільки він є універсальним. Використовуючи цей регулятор, можна отримати будь-який закон регулювання, оскільки в нього входять усі складники інших законів. Ще однією перевагою ПІД-регулятора є його можливість запобігати очікуваному відхиленню регульованої величини, реагуючи лише на вже наявне відхилення. Він виробляє додатковий регульовальний вплив, пропорційний швидкості відхилення регульованої величини від заданого значення [1].

Але для того щоби вся система працювала, треба знайти параметри для ПІД-регулятора, і в цьому випадку можна вибрати навіть найпростіший спо-

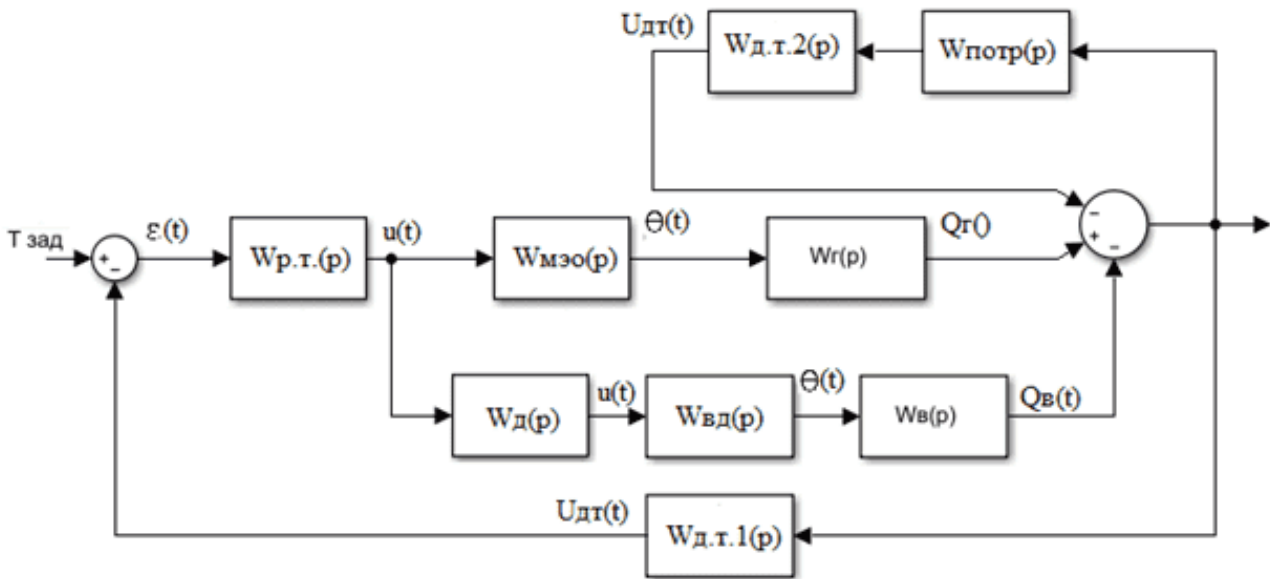


Рис. 3. Структурна схема системи автоматичного керування

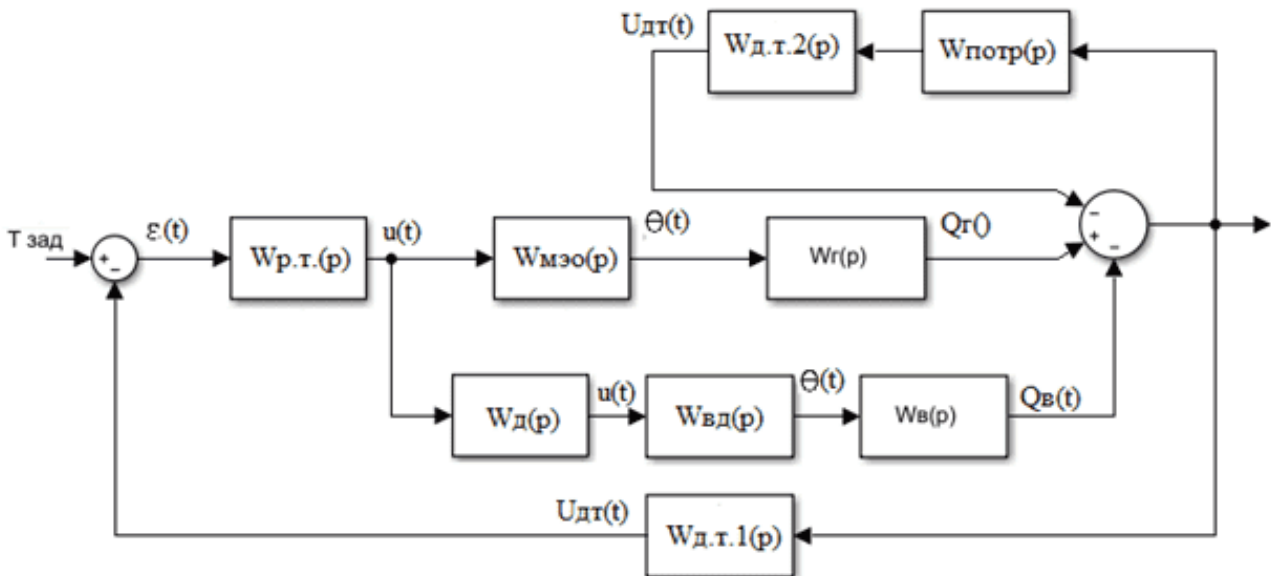


Рис. 4. Системи автоматичного керування водогрійного котла в середовищі Simulink

сіб: у налаштуваннях цього регулятора натиснути на кнопку «Tune» й отримати готові параметри для регулятора. Цей спосіб хоч і простий, але теж дає змогу знайти необхідні параметри регулятора та застосувати їх у процесі регулювання.

Для оцінювання якості управління системою автоматичного керування з розробленим ПІД-законом управління виконано моделювання процесу зміни температури води на виході водогрійного котла під час зміни збурюючого впливу на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (у момент часу  $t, t=1300\text{ c}$ ), зміна температури задається на  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (у момент часу  $t=1900\text{ c}$ ). Реакція системи автоматичного керування на ці збурення зображено на рисунку 5.

**Висновки.** У матеріалі було розглянуто такий об'єкт, як водогрійний котел. Було розглянуто його основні властивості, а також виведено основні параметри для регулювання цього об'єкта. Завдяки цим знанням було виконано синтез регулятора температури води на виході з водогрійного котла. Виконане моделювання з використанням цієї моделі показало задовільну якість керування температурою води на виході водогрійного котла – як по каналу вхідних параметрів, так і по каналу збурення. Ця система автоматичного керування допоможе підвищити якість регулювання цим об'єктом, а також допоможе підвищити економію за ресурсами, а саме щодо газу.



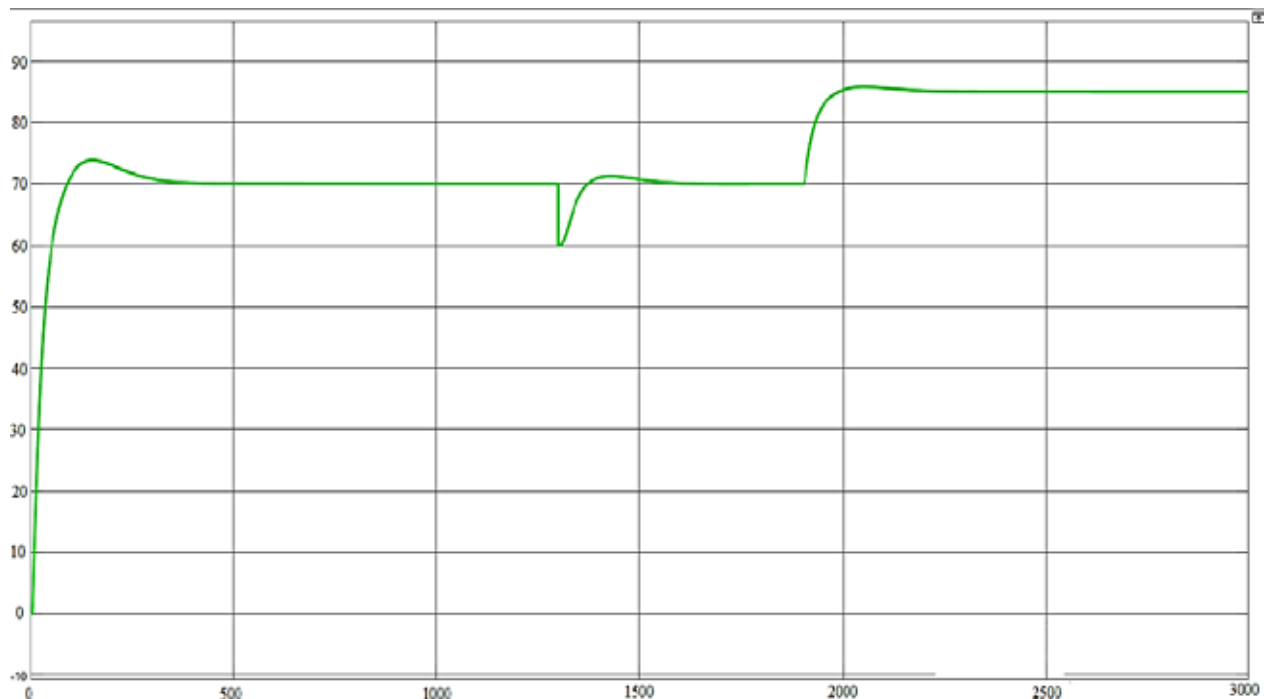


Рис. 5. Зміна температури води на виході котла з використанням розробленої системи автоматичного керування

#### Список літератури:

1. Ахметжанов Р.Д., Федюк Р.В. Розробка і дослідження системи автоматичного керування параметрами водогрійних котлів системи централізованого теплопостачання міського мікрорайону. Донецьк : ДонНТУ, 2015. 15 с.
2. Бузников Е.Ф., Роддатис К.Ф. Производственные и отопительные котельные. Москва : Энергоатомиздат, 1984. 248 с.
3. Плетнев Г.П., Зайченко Ю.П., Зверев Е.А., Киселев Ю.Е. Проектирование, монтаж и эксплуатация автоматизированных систем управления теплоэнергетическими процессами. Москва : Издательство МЭИ, 1995. 316 с.
4. Рыбалев А.Н. Автоматическое управление энергетическими установками : учебное пособие. Благовещенск : Амурский государственный университет, 2007. 105 с.

#### Gostishchev V.O., Maksimov M.V. RESEARCH OF AUTOMATIC BOILER CONTROL SYSTEM

*It was studied in detail what is an object such as a boiler and studied its main properties, which will help build an automatic control system. The main parameters of this object that can be adjusted and which of them are perturbations on this object were also investigated. The main parameters for the control of this object and possible disturbances that may affect the control processes were derived. It is studied which control law should be applied to the automatic control system and which regulator should be applied to this system. A detailed study of the automatic control system and its resistance to disturbance. Graphs for more effective study of this automatic control system are given and conclusions are made on the basis of experiment on this control system. It is explained whether this system really does its job and the main theses for consolidating the theory of resistance of this system to disturbances are given.*

*The general behavior of the boiler in case of disturbances in the form of a given water temperature, which should be increased over time, and conclusions were made about finding the parameters of the regulator for this control system of the boiler. The general properties of the received automatic control system are investigated and conclusions about importance of development of this control system and its possible pluses for a boiler are made. These are the main points for which this automatic control system has great advantages in terms of regulation and its impact on various factors, such as fuel consumption and air consumption. Conclusions about the reliability of this automatic control system, based on the results of the study of this system. Conclusions are also made about the relevance of this study in our time. The relevance of the application of this automatic control system for this installation and the derivation of the main theses for the use of this automatic control*



*system based on the results of research as the installation itself and the impact on this installation of automatic control system. All data derived from this study were also analyzed in detail and conclusions were drawn based on the results obtained during the study. This study shows us the use of a more modern system of automatic control of the boiler, which is more rational to use for this type of object, based on the effectiveness of its use at present. The study was conducted on a more detailed model of the boiler, which will examine in detail this control system and show its effectiveness in a real study.*

**Key words:** hot water boiler, water heating, mathematical model, boiler, water temperature.

**Дубко В.О.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## НЕКЛАСИЧНІ МОДЕЛІ СТОХАСТИЧНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

*У статті розглянуті моделі випадкових процесів, які відрізняються від традиційних. Вказана область їх застосування в процесі моделювання реальних процесів, явищ і систем, з урахуванням вимоги обмеження варіації процесів. Сучасна теорія стохастичних диференціальних рівнянь забезпечує можливість моделювання стохастичних процесів обмеженої варіації не тільки в середньому, але і на їх реалізаціях. Ця можливість демонструється на прикладі орієнтованої ланцюга, зафіксованої в початковій точці. Сформульована теорема показує математичний зв'язок між моделями дискретного і неперервного ланцюжків. Наведені приклади появи перших інтегралів для стохастичних систем і зазначена можливість забезпечення стійкості притягаючого многовиду. Підкреслюється важливість та наводяться приклади застосування принципу Ланжевена в процесі побудови рівнянь стохастичної динаміки. Для моделі Ланжевена динаміки броунівської частинки з ортогональними випадковими впливами на її швидкість у режимі, коли модуль початкової швидкості руху частинки знаходиться на многовиді, який, як було встановлено раніше, притягуючий, наведено рівняння для щільності розподілу часток. Розглядаються особливості поведінки розв'язків цього рівняння залежно від співвідношення між коефіцієнтом стоксовського тертя і при вінерівських збуреннях, ортогональних до швидкості. Зазначено наявність коливальних процесів для ансамблю частинок. Наведено явний розв'язок характеристичної функції для щільності положення частинок. Показано, що спектр характеристичної функції містить області неперервних значень, де спостерігається коливні процеси, і область, де коливання відсутні. Ці результати підтверджують висновок про те, що модель динаміки броунівської частинки, яка побудована на основі нетрадиційного фізичного трактування рівнянь Ланжевена – стохастичних рівнянь з ортогональними впливами, призводить до трактування ансамблю броунівських часток як системи, що має властивості хвильовими. Продемонстровано роль вибору типу стохастичного диференціального рівняння, зокрема, Стратоновича, а не Іто, на прикладі виключення, пов'язаного з математичною моделлю Лоренца, парадоксу самоприскорення електрона, що взаємодіє з власним полем.*

**Ключові слова:** обмежені варіації, модель Лоренца, стохастичне рівняння, ортогональні впливи, орієнтований ланцюг.

**Постановка проблеми.** Зміни реальних процесів, реальних середовищ, у тому числі і стохастичних, завжди пов'язані з обмеженнями на їхні варіації. Під час моделювання детермінованих явищ такі обмеження вводяться, наприклад, у формі законів збереження. Включення в розгляд невизначеності (відкритість системи) істотно змінює інтерпретацію моделей. На практиці обмеження для відкритої системи (ВС) формуються з використанням усереднених показників. Для реальних технічних і природних систем це призводить до того, що поняття ризику стає прийнятним: прийняття неминучості руйнування системи в непередбачений момент [7]. Це тупиковий шлях. Вихід може полягати в тому, що обмеження і для моделей ВС (систем, що знаходяться під впливом випадкових збурень, які порівняльні з величинами-показниками стану самої системи) мають бути пов'язані не тільки з усередненими характеристиками, але й з конкретними реалізаціями-подіями.

Дослідження в цьому напрямі виконувались нами в різний час, включно до поточного 2021 р. Публікувалися результати в різних виданнях, що ускладнює охоплення і критичний аналіз отриманих висновків.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У цій роботі наведені і розширені деякі наші результати, пов'язані з моделюванням стохастичних процесів обмеженої варіації (перша модель), існуванням невідповідного інваріанту (друга модель) для стохастичного процесу, вивченням динаміки ансамблю броунівських частинок, коли випадкові впливи ортогональні до їх швидкості (третя модель).

Четверта модель на прикладі рівняння Лоренца [18] взаємодії електрона з власним полем демонструє, як за рахунок вибору представлення стохастичного рівняння (інтерпретації процесу що моделюється) виникає можливість «виключити» парадокс самоприскорення електрона [14].

Нумерація формул – подвійна. Перша цифра – номер розділу, а друга – поточна нумерація формули в розділі.

**1. Стохастичні процеси обмеженої варіації**

Як приклад моделі процесу обмеженої варіації розглянемо таку систему рівнянь:

$$x(t) = \tilde{x}(t) - x(0) = \int_0^{L(t)} \alpha(u, t) \cos(\varphi(u, t)) du, \quad (1.1a)$$

$$y(t) = \tilde{y}(t) - y(0) = \int_0^{L(t)} \alpha(u, t) \sin(\varphi(u, t)) du, \quad (1.1b)$$

де  $\alpha(u, t), \varphi(u, t)$  – випадкові скалярні полюси,  $L(t)$  – функція, зв’язана з класом процесів, що моделюються. Покладаємо, що  $\int_0^{L(t)} |\alpha(u, t)|^2 du$  – обмежений.

Рівняння (1.1), коли  $0 < \alpha(u, t) \leq c$ ;  $L(t) = ct$ , моделюють випадкове блукання в  $R^2$ , з обмеженою за величиною швидкістю, на поверхні або в тонкому прошарку, утворення тріщин у породах, рукавів дельти ріки.

Якщо  $\alpha(u, t) > 0$ ;  $L(t) = L, \forall t$ , то рівняння (1.1) – модель зміни відстані  $Z(t) = (|x(t)|^2 + |y(t)|^2)^{0.5}$  між кінцями нитки (струни), полімерних ланцюгів (зміни розміру глобули) в  $R^2$ .

Дискретна аналогія моделі (1.1) – це об’єднання процесів обертальної дифузії для послідовно з’єднаних ланок у  $R^2$ :

$$x_n(l; t) = \sum_{s=1}^n \alpha(l_s; t) \cos \varphi_s(t) \cdot \Delta_s \quad (1.2)$$

$$y_n(l; t) = \sum_{s=1}^n \alpha(l_s; t) \sin \varphi_s(t) \cdot \Delta_s$$

де  $\alpha(l_s; t), \varphi_s(t)$  – випадкові процеси;  $l_1 < l_2 < \dots < l_n \leq l, \sum_{s=1}^n \Delta_s = const$ .

На відміну від моделей, що досліджувалися іншими авторами, специфікою (1.2) є залежність повороту поточної ланки від попередньої. Це дало підставу трактувати такі послідовності як стохастичні, ієрархічно-скорельовані ряди (серії) [8, с. 7]. Зазначимо, що фіксація точки відліку на самому ланцюзі приводить до задач про динаміку щодо цієї точки двох незалежних відрізків.

Формули (1.1), (1.2) можемо розглядати і як модель вкладених вихорів при турбулентній дифузії, переносу пасивної домішки під їхньою дією (модель експансії).

Взаємозв’язок між (1.1) і (1.2) розглядався в роботі [6], для полів  $\{x_N(l; t); y_N(l; t)\}, N \rightarrow \infty$ , за додаткових умов:

$$\alpha(l; t) = \alpha(l) > 0, l \in [0, L], \quad (1.3в)$$

$$\sum_{s=1}^N \alpha(l_s) \Delta \leq const, \alpha(l) \in \mathbb{C}_{[0, L]}^1, \Delta = L / N \quad (1.3в)$$

$$\varphi_k = \sum_{s=1}^k \eta(l_s, t) \Delta(w(l_s)), t \in [0, T], \quad (1.4)$$

$$\eta(l_s; t) = \int_0^t b(l_s; \tau) dw_s(\tau), b(l; t) \in \mathbb{C}_{[0, L] \times [0, T]}^2 \quad (1.5)$$

де  $\Delta(w(l_s)), \Delta w_s(\tau)$  – незалежні прирости (за випередженням) для незалежних  $\forall s$  вінерівських процесів.

**Теорема 1.** [6]. За умови виконання вимог (1.3) – (1.5) послідовність (1.2) слабо збігається, при  $N \rightarrow \infty$ , до поля  $\{x(l; t); y(l; t)\}$ , компоненти якого є розв’язком задачі Коші для системи стохастичних диференціальних рівнянь Іто:

$$\begin{cases} d_l q(l; t) = \left[ q(l; t) \frac{\partial}{\partial l} \ln \alpha(l) - \frac{1}{4} q(l; t) \int_0^t b^2(l; \tau) d\tau \right] dl + \\ \quad + \left( \frac{1}{2} \int_0^t b^2(l; \tau) \right)^{1/2} p(l; t) dw(l) \\ d_l p(l; t) = \left[ p(l; t) \frac{\partial}{\partial l} \ln \alpha(l) - \frac{1}{4} p(l; t) \int_0^t b^2(l; \tau) d\tau \right] dl - \\ \quad - \left( \frac{1}{2} \int_0^t b^2(l; \tau) \right)^{1/2} q(l; t) dw(l) \end{cases}, \quad (1.6a)$$

$$d_l x(l; t) = q(l; t) dl, \quad d_l y(l; t) = p(l; t) dl, \quad (1.6в)$$

$$x(0; t) = 0, \quad y(0; t) = 0, \quad p(0; t) = \alpha(0), \quad q(0; t) = 0.$$

Зокрема, коли й  $\alpha(l) = \alpha = c$  і  $b(l; t) = b$  – постійні, то система (1.6a) переходить у таку:

$$\begin{cases} d_l p(l; t) = -\frac{1}{4} p(l; t) t b^2 dl - \left( \frac{1}{2} t b^2 \right)^{1/2} q(l; t) dw(l) \\ d_l q(l; t) = -\frac{1}{4} q(l; t) t b^2 dl + \left( \frac{1}{2} t b^2 \right)^{1/2} p(l; t) dw(l) \end{cases} \quad (1.7)$$

Розв’язок (1.7) має вигляд:

$$\begin{aligned} p(l; t) &= c \cos(w(l) \left( \frac{1}{2} t b^2 \right)^{1/2}), \\ q(l; t) &= c \sin(w(l) \left( \frac{1}{2} t b^2 \right)^{1/2}), \end{aligned} \quad (1.8a)$$

Отже, через (1.6в),

$$\begin{aligned} x(l; t) &= c \int_0^l \cos(w(u) \left( \frac{1}{2} t b^2 \right)^{1/2}) du, \\ y(l; t) &= c \int_0^l \sin(w(u) \left( \frac{1}{2} t b^2 \right)^{1/2}) du, \end{aligned} \quad (1.8в)$$

Якщо  $l = ct$ , то доходимо співвідношень:

$$\begin{cases} \tilde{x}(t) = c \int_0^{tc} \cos(w(u) \left(\frac{1}{2} t \sigma^2\right)^{1/2}) du, \\ \tilde{y}(t) = c \int_0^{tc} \sin(w(u) \left(\frac{1}{2} t \sigma^2\right)^{1/2}) du. \end{cases} \quad (1.9)$$

Рівняння (1.9) отримано за умови, що початкова «швидкість» (1.8а) спрямована уздовж осі  $x$ . У загальному випадку коли  $\varphi_0 \neq 0$ , як впливає з (1.1), і при початкових значеннях відмінних від 0,

$$\tilde{x}(t) = \cos(\varphi(0))x(t) - \sin(\varphi(0))y(t) + x(0),$$

$$\tilde{y}(t) = \cos(\varphi(0))y(t) + \sin(\varphi(0))x(t) + y(0),$$

де  $x(t)$  і  $y(t)$  визначаються (1.8в).

Повернемося до рівнянь (1.6), яке представимо таким чином:

$$\begin{cases} d_l p(l;t) = p(l;t)a(t;l)dl - q(l;t)\bar{b}(t;l)dw(l) \\ d_l q(l;t) = q(l;t)a(t;l)dl + p(l;t)\bar{b}(t;l)dw(l) \end{cases},$$

$$d_l x(l;t) = q(l;t)dl, \quad d_l y(l;t) = p(l;t)dl,$$

де

$$a(t;l) = \left[ \frac{\partial}{\partial l} \ln \alpha(l) - \frac{1}{4} \int_0^l b^2(l;\tau) d\tau \right],$$

$$\bar{b}(t;l) = \left( \frac{1}{2} \int_0^l b^2(l;\tau) \right)^{1/2}, \quad (1.10)$$

Скориставшись формулою Іто, знаходимо:

$$d_l p^2(l;t) = 2p^2(l;t)a(t;l)dl + q^2(l;t)\bar{b}(t;l)dl - 2q(l;t)p(l;t)\bar{b}(t;l)dw(l),$$

$$d_l q^2(l;t) = 2q^2(l;t)a(t;l)dl + p^2(l;t)\bar{b}(t;l)dl + 2q(l;t)p(l;t)\bar{b}(t;l)dw(l).$$

Просумуємо ці рівняння:

$$d_l (p^2(l;t) + q^2(l;t)) = (p^2(l;t) + q^2(l;t))[2a(t;l) + \bar{b}^2(t;l)]dl.$$

Розв'язок цього рівняння такий:

$$(p^2(l;t) + q^2(l;t)) = (p^2(0;t) + q^2(0;t)) \exp \left[ \int_0^l [2a(t;u) + \bar{b}^2(t;u)] du \right]$$

Для постійних  $\alpha$  і  $b$  з урахуванням (1.10),

$$(p^2(l;t) + q^2(l;t)) = c^2 \exp[2^{-1}l(-\sigma^2 + \sigma^2)] = c^2, \quad \forall t \geq 0, \forall l \leq L.$$

## 2. Існування керуючих параметрів, що забезпечують збереження і стійкість вибраних показників.

Важливим є питання, яке пов'язане з теорією керування: побудова керуючих параметрів, що забезпечують збереження, стійкість конкретних функціоналів-показників від керованих змінних (існування

областей, що притягають). Причому закони розподілу збурень не обов'язково мають бути відомі.

Розглянемо рівняння

$$dx(t;\lambda) = [-\mu(t)E + \frac{1}{2}F]x(t;\lambda)dt + dw(t)a(t) \sum_{k=1}^3 B_k(t)x(t;\lambda), \quad (2.1)$$

де  $B_k$  – матриці групи поворотів у  $R^3$ ,  $E$  – одинична матриця і

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Для цього рівняння можуть існувати багатовиди, що притягають, незважаючи на те, що вінерівський процес  $w(t)$  – це процес, що допускає які завгодно великі варіації.

Загальний вигляд розв'язку (2.1) у припущенні, що його коефіцієнти забезпечують умови існування та єдиності розв'язку, такий [5]:

$$x(t;\lambda) = f(t)P(t)x(0;\lambda),$$

$$\text{де } f(t) = \exp \left\{ \int_0^t (a^2(\tau) - \mu(\tau)) d\tau \right\},$$

$$P(t) = \left[ E + \frac{\sin(|z(t)|)}{|z(t)|} q(t) \sum_{k=1}^3 B_k + \frac{2 \sin^2 \left( \frac{1}{2} |z(t)| \right)}{|z(t)|^2} \left( q(t) \sum_{k=1}^3 B_k \right)^2 \right],$$

$$z^2(t) = 3(q(t))^2, \quad q(t) = \int_0^t a(\tau) dw(\tau).$$

Можемо переконаватися, що  $|x(t;\lambda)|$  – не випадкова величина:

$$|x(0;\lambda)| \exp \left\{ \int_0^t (a^2(\tau) - \mu(\tau)) d\tau \right\} = |x(t;\lambda)|.$$

Якщо  $a(t)$  і  $\mu(t)$  розглядати як керуючі параметри, то при такому їх виборі:  $a^2(t) = \mu(t)$ ,  $|x(0;\lambda)| = |x(t;\lambda)|, \forall t \geq 0$ . Тобто відбувається рух на сфері.

У разі складнішої залежності керуючих параметрів можливе виникнення множини областей, що притягають та перемешковуються областями нестійкості.

У попередній моделі закон збурення був відомий. Як приклад, що пояснює і підтверджує можливість існування детермінованих функціоналів, коли закони збурень процесу не обов'язково відомі, розглянемо такий процес:

$$x(t, \lambda) = \exp\left\{\sum_{k=1}^m \xi_k(t) B_k(t; \lambda)\right\} g(t; \lambda)$$

де  $B_k(t; \lambda) = -B_k^*(t; \lambda)$  (\* – знак транспонування) – матриці  $n \times n$ ,  $\xi_k(t)$  випадкові скалярні процеси;  $x(t, \lambda), g(t; \lambda)$  – векторні процеси в  $R^n$ ,  $\lambda \in D_0 \subset R^n$ . Скалярний добуток  $(x(t, \lambda), x(t, \lambda)) = (g(t; \lambda), g(t; \lambda))$ , як можна перекоонатися, не залежить від характеру збурень  $\xi_k(t)$  [5].

Прикладом подібної стійкості може служити здатність природного середовища не тільки повертатися, але і знаходитися в області визначених показників за умови постійно діючих випадкових збурень.

### 3. Некласична модель броунівського руху [7].

Ключовою властивістю, що призводить на макроскопічному рівні до дифузійного переносу речовини, є хаотичний характер руху кожної частки. Математичну модель динаміки частинки будемо досліджувати, спираючись на стохастичне рівняння Іто:

$$\varepsilon dv_j(t) = -a(x(t), t)v_j(t)dt + f_j(x(t), t)dt + \sum_{k=1}^m b_{j,k}(x(t), v(t), t)dw_k(t), \quad (3.1)$$

$$dx(t) = v(t)dt.$$

де  $v(t)$  – швидкість броунівської частки,  $x(t)$  – її поточне положення,  $a(\cdot) > 0$  – макропараметр, що відіграє роль в'язкості середовища,  $dw_k(t)$  – прирости за випередженням щодо поточного моменту  $t$ , незалежних вінерівських процесів  $w_k(t)$ ,  $\varepsilon > 0$  – скалярний параметр.

Рівняння (3.1) назвають рівнянням Ланжевена [17]. Включення випадковості розглядається як метод, що дає змогу замінити безліч взаємодій із навколишніми системами ефективними випадковими процесами, що забезпечать виконання принципу узгодженості Ланжевена: *вимога співпадіння осереднених значень характеристик на мікрорівні, з відповідними аналогами на макрорівні*. Ця умова призводить до необхідності взаємозв'язку між  $a(\cdot)$  і коефіцієнтами  $b_{j,k}(\cdot)$  в (3.1).

Основна проблема теорії броунівського руху – обґрунтування переходу від динамічного опису руху броунівської частинки в просторі швидкостей і координат до опису явища дифузії тільки в просторі координат (перехід до дифузійного наближення). Загальний математичний висновок такий: перехід до скороченого опису вдається здійснити на основі моделей (3.1), коли  $\varepsilon \rightarrow 0$  ([2], [3], [12], [20], [20] та ін.). Це відповідає тому, що швидкість броунівської частинки необмежено зростає.

У [3] було встановлено, що в разі асимптотичного переходу від розв'язку  $x(t)$  системи (3.1) для неоднорідного середовища рівняння для щільності розподілу невзаємодіючих броунівських частинок – розв'язок рівняння дифузії, що відповідає другому закону Фіка. Цей результат, очевидно, вирішує суперечку [15] про опис динаміки броунівських часток на користь рівнянь Іто, а не Стратоновича [3].

Звернемо увагу на те, що завдяки необмеженій варіації вінерівського процесу у класичних моделях (3.1) швидкості броунівських частинок можуть приймати які завгодно великі значення, однак хоча б з урахуванням висновків теорії відносності це неприпустимо. Розуміння цього [22] є мотивацією розгляду моделей динаміки броунівських частинок, коли їхня швидкість обмежена. У роботах [13] досліджувалось модель випадкового переміщення уздовж прямої, коли швидкість змінюється на протилежну у випадкові моменти часу. Надалі з'явилося багато робіт [16; 19; 35], пов'язаних із переносом цієї схеми на багатомірний випадок. Є роботи, пов'язані, наприклад, із моделюванням поширення світла в мутних середовищах, частіше на основі представлення про випадкові кути повороту вектора швидкості: наприклад, модель із роботи [24] та модель із розділу 1 цієї роботи.

Розглянемо нетрадиційну модель динаміки броунівської частинки. В основу цієї моделі покладені висновки теорії перших інтегралів для стохастичних рівнянь (1978 р.) [1].

Підкреслимо, що для великих швидкостей частинки за напрямом її руху зменшується інтенсивність відхилень від усередненого впливу. У той же час при русі в просторі розмірності вище двох інтенсивність впливів, перпендикулярних напрямку руху частки, не залежить від її швидкості [21] (аналогія – «переміщення під дощем»). Це обґрунтовує розгляд моделей із поділом випадкових впливів на швидкість руху броунівської частки: за напрямом її руху та перпендикулярних йому.

У роботі [10] розглянуто рівняння Ланжевена з ортогональними випадковими впливами на швидкість броунівської частинки та побудовано характеристичне рівняння для процесу  $\{v(t), x(t)\}$ :

$$\begin{cases} dv(t) = -a(t)v(t)dt + \frac{b(t)}{|v(t)|} [v(t) \times dw(t)], \\ dx(t) = v(t)dt, \quad v(t), x(t) \in R^3. \end{cases} \quad (3.2)$$

У припущенні незалежності  $x(0)$  і  $v(0)$  рівняння для щільності розподілу

$$\rho(t, x / v(0)) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(t, x / y; v(0)) \rho(y) dy_1 dy_2 dy_3,$$

при сталих значеннях коефіцієнтів  $a$  і  $b$  є таким:

$$\frac{\partial^2 \rho(t, x / v(0))}{\partial t^2} + a \frac{\partial \rho(t, x / v(0))}{\partial t} = 3^{-1} |v(0)|^2 [1 - \exp\{-3at\}] \nabla_x^2 \rho(t, x / v(0)) + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 v_i(0) v_j(0) \frac{\partial^2 \rho(t, x / v(0))}{\partial x_i \partial x_j} \quad (3.3)$$

Були досліджені властивості розв'язків рівняння (3.3) при різних співвідношеннях між коефіцієнтами:

- $a = \tilde{a}\varepsilon^{-1}$ ,  $b = \tilde{b}\varepsilon^{-1}$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$ ,
  - $a = \varepsilon a_0$ ,  $b^2 / \varepsilon a_0 = |v(0)|^2 = const$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$ ,
- де  $\tilde{a}, a_0, \tilde{b}$  – обмежені величини.

У першому випадку (дифузійне наближення) спостерігається уповільнення процесу дифузії за напрямом  $\frac{v(0)}{|v(0)|}$ . У другому (випадок слабких взаємодій із середовищем) – щільність ймовірності розподілу ансамблю частинок апроксимується розв'язком хвильового рівняння.

Рівняння характеристичної функції для  $\rho(t; x / v(0))$ , коли  $a$  та  $b$  постійні величини, і  $b^2 / a = |v(0)|^2 = const$ , таке:

$$\frac{d^2 \psi(t; \lambda)}{dt^2} + a \frac{d\psi(t; \lambda)}{dt} = -|\lambda|^2 f(t) \cdot \psi(t; \lambda) - (\lambda, V)^2 \psi(t; \lambda), \quad (3.4)$$

де  $V = V(0)$  – початкове значення швидкості частки,  $a$  – коефіцієнт «стоксового тертя», (розмірність  $t^{-1}$ ), і  $f(t) = \frac{|V|^2}{3} (1 - e^{-3at})$ .

Ці умови відповідають тому, що початкове значення  $v(0) = V$  знаходиться на поверхні стійкості для процесу  $v(t; 0)$ . Зберігаємо припущення незалежності  $x(0), v(0)$ .

Для рівняння (3.4) існує розв'язок. Доведення цього твердження наведено в [11].

**Теорема 1.** Загальний розв'язок  $\psi(t)$  рівняння (4.4) за умови, що  $|\lambda| \in \left[0, a \frac{2\sqrt{3}}{|V|}\right]$ , є таким:

$$\psi(t) = C_1 F_{\nu}(t) e^{-\frac{[1+3\nu]at}{2}} + C_2 F_{-\nu}(t) e^{-\frac{[1-3\nu]at}{2}},$$

$$\text{де } \nu = \frac{1}{3a} \sqrt{a^2 - 4\beta^2} \quad (\nu \geq 0),$$

$$F_{\pm\nu}(t) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[p \cdot \eta(t)]^{2m}}{\Gamma(m \pm \nu + 1) m!}, \quad \eta(t) = e^{-\frac{3at}{2}}, \quad p = \frac{\alpha}{3a} \geq 0,$$

$$\alpha^2 = \frac{|\lambda|^2 |V|^2}{3},$$

$\Gamma(m \pm \nu + 1)$  – гама функція, а  $C_1$  і  $C_2$  – розв'язки системи рівнянь:

$$\begin{cases} C_1 F_{\nu}(0) + C_2 F_{-\nu}(0) = M[\exp\{i(\lambda, x(0))\}] \\ C_1 \frac{\partial e^{-\frac{[1-3\nu]at}{2}} F_{\nu}(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} + C_2 \frac{\partial e^{-\frac{[3\nu+1]at}{2}} F_{-\nu}(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = -i(\lambda, v(0)) M[\exp\{i(\lambda, x(0))\}] \end{cases}$$

**Теорема 2.** Загальний розв'язок  $\psi(t)$  рівняння (4.4) для значень  $|\lambda| \notin \left[0, a \frac{2\sqrt{3}}{|V|}\right]$ , є таким:

$$\psi(t) = e^{-\frac{at}{2}} \cdot [C_1 \varphi_1(t) + C_2 \varphi_2(t)],$$

$$\varphi_1(t) = \Phi_1(t, \gamma) \cdot \cos(\sigma - \mu t) + \Phi_2(t, \gamma) \cdot \sin(\sigma - \mu t),$$

$$\varphi_2(t) = \Phi_1(t, \gamma) \cdot \sin(\sigma - \mu t) - \Phi_2(t, \gamma) \cdot \cos(\sigma - \mu t).$$

де  $\sigma = \gamma \ln p$ ,  $\mu = 3a\gamma$ ,  $\gamma = \frac{1}{3a} \cdot \sqrt{4\beta^2 - a^2} > 0$ ,

$$p = \frac{|\lambda| |V|}{3a\sqrt{3}}, \quad \beta^2 = \frac{|\lambda|^2 |V|^2}{3} + (\lambda, V)^2,$$

$$\Phi_1(t, \gamma) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[p \cdot \eta(t)]^{2m} \cdot Q_1(\gamma, m)}{m! \cdot [Q_1^2(\gamma, m) + Q_2^2(\gamma, m)]},$$

$$\Phi_2(t, \gamma) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{[p \cdot \eta(t)]^{2m} \cdot Q_2(\gamma, m)}{m! \cdot [Q_1^2(\gamma, m) + Q_2^2(\gamma, m)]},$$

$$Q_1(\gamma, m) = \int_0^{\infty} \cos(\gamma \ln \tau) \cdot \tau^m \cdot e^{-\tau} d\tau,$$

$$Q_2(\gamma, m) = \int_0^{\infty} \sin(\gamma \ln \tau) \cdot \tau^m \cdot e^{-\tau} d\tau,$$

де  $C_1$  і  $C_2$  – розв'язки системи рівнянь:

$$\begin{cases} [C_1 \varphi_1(0) + C_2 \varphi_2(0)] = M[\exp\{i(\lambda, x(0))\} / V] \\ C_1 \frac{\partial \varphi_1(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} + C_2 \frac{\partial \varphi_2(t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = -[i(\lambda, v(0)) - a2^{-1}] M[\exp\{i(\lambda, x(0))\} / V]. \end{cases}$$

**Теорема 1, 2** показують, що в спектрі характеристичної функції, що є розв'язком (3.4), присутня область коливних складників для будь-яких значень параметрів  $a$  і  $b$ , за умови, що  $b^2/a = |v(0)|^2 = const$ . Це підтверджує висновок про те, що еволюція ансамблю броунівських часток, траєкторії яких є розв'язком рівнянь Ланжевена з ортогональними збуреннями, пов'язана з коливними процесами. Таким чином, для цієї моделі динаміки броунівської частинки ансамбль броунівських частинок – це потік із хвильовими

властивостями. Ці результати узгоджуються з висновками роботи [10].

**4. Використання різних представлень стохастичних рівнянь.**

Як і вище, динаміку системи моделюємо за допомогою стохастичних диференціальних рівнянь. Включення випадкових збурення в динамічні рівняння розглядається як метод, що дає змогу замінити безліч взаємодій із навколишніми системами такими ефективними випадковими процесами, які забезпечать виконання принципу погодженості: збіг середніх характеристик, що мають аналоги на макрорівні.

Є різні представлення стохастичних рівнянь, і пов'язано це не тільки з вибором розподілу збурюючого процесу, але і з характером його впливу на динаміку щодо поточного моменту часу. У класичній теорії динамічних систем, вибір околу  $t$  не відіграє ролі. Але в процесі переходу до моделювання дисипативних систем ця вимога стає істотним додатковим обмеженням у виборі класу рівнянь для моделювання реальних явищ. Вибір може бути виконаний тільки на основі конкретних представлень про реальний процес, що моделюється.

Між різними представленнями стохастичних рівнянь, виходячи, наприклад, із вимоги збіжності в середньоквадратичному розв'язку для різних представлень можна встановити взаємозв'язок. Це дає змогу вибрати рівняння з огляду на представлення про реальний процес, а потім перейти до представлення, яке зручніше для виконання досліджень.

Аналітичний зв'язок між коефіцієнтами рівняння Іто

$$dx_i(t) = a_i(t)dt + \sum_{k=1}^m b_{i,k}(t)dw_k(t), \quad x(0) = x \in R^n,$$

де  $dw_k(t)$  – випереджальні щодо поточного моменту часу  $t$  збільшення незалежних вінерівських збурень  $w_k(t)$ , і Стратоновича:

$$dx_{i,s}(t) = \bar{a}_i(t)dt + \sum_{k=1}^m \bar{b}_{i,k}(t)d\bar{w}_k(t), \quad x_s(0) = x,$$

де прирости  $d\bar{w}_k(t)$  – симетричні щодо поточного моменту часу  $t$ , є такими:

$$b_k(t) = \bar{b}_k(t),$$

$$a_i(t) = \bar{a}_i(t) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m b_{j,k}(t) \frac{\partial b_{i,k}(t)}{\partial x_j}, \quad (4.1)$$

Вибір одного з представлень істотний для правильного відображення і трактування явищ та процесів у реальних системах.

Продемонструємо це на модельному прикладі рівняння динаміки електрона з урахуванням взаємодії з власним полем, побудованого Лоренцем:

$$\varepsilon d\left(\frac{d}{dt}v(t)\right) = \frac{dv(t)}{dt}dt - \frac{1}{m_s}F(t)dt, \quad (4.2)$$

де  $v(t) \in R^1$  – швидкість електрона,  $F(t)$  – поле зовнішніх сил,  $\varepsilon$  – малий параметр,  $m_s$  – ефективна маса електрона [14].

Розв'язок рівняння (4.2) веде до відомого парадокса самоприскорення електрона [9]. Виключення цього ефекту можливе, якщо змінити знак при  $\frac{dv(t)}{dt}$  в (4.2):

$$\varepsilon d\left(\frac{d}{dt}v(t)\right) = -\frac{dv(t)}{dt}dt - \frac{1}{m_s}F(t)dt$$

Мотиви такого переходу наведені в [9].

Покажемо, як ефект самоприскорення можна виключити, якщо додати у (4.2) шум вакууму. Вважаємо, що шум – вінерівський процес. Припустимо, що цей вплив щодо поточного моменту  $t$  відображається на основі рівняння Стратоновича:

$$\varepsilon d\left(\frac{d}{dt}v(t)\right) = \frac{dv(t)}{dt}dt - \frac{1}{m_s}F(t)dt + b(t)d\bar{w}(t), \quad (4.3)$$

Перехід від (4.3) до представлення Іто з урахуванням взаємозв'язку між коефіцієнтами рівнянь Іто і Стратоновича (4.1) приводить до рівняння:

$$\varepsilon d\left(\frac{d}{dt}v(t)\right) = \frac{dv(t)}{dt}dt - \frac{1}{m}F(t)dt + 2^{-1} \frac{1}{\varepsilon} b(t) \frac{\partial b(t)}{\partial \left(\frac{dv(t)}{dt}\right)} dt + b(t)dw(t), \quad (4.4)$$

Від'ємність коефіцієнта при  $\frac{dv(t)}{dt}$  в (4.4), можна забезпечити вимогою:

$$\frac{dv(t)}{dt} + \frac{1}{4\varepsilon} \frac{\partial b^2(t)}{\partial \left(\frac{dv(t)}{dt}\right)} = -\eta \frac{dv(t)}{dt}, \quad \eta > 0.$$

Наприклад, виберемо  $b^2(t) = f(u) \leq 1$ ,  $u = [1 + \gamma \left(\frac{dv(t)}{dt}\right)^2]^{-1}, \gamma > 0$ . Тоді

$$\frac{dv(t)}{dt} \left[ 1 - \frac{1}{2\varepsilon} \gamma \frac{1}{(1 + \gamma \left(\frac{dv(t)}{dt}\right)^2)^2} \frac{\partial f(\cdot)}{\partial u} \right] = -\eta \frac{dv(t)}{dt}.$$

Нехай

$$\frac{1}{(1 + \gamma \left(\frac{dv(t)}{dt}\right)^2)^2} \frac{\partial f(\cdot)}{\partial (1 + \gamma \left(\frac{dv(t)}{dt}\right)^2)^{-1}} = 1$$

Цю рівність забезпечує функція

$$f(\cdot) = 3^{-1} \left( 1 + \gamma \left( \frac{d\nu(t)}{dt} \right)^2 \right)^{-3}.$$

Рівняння (4.4) у цьому разі переходить у таке:

$$\varepsilon d \left( \frac{d}{dt} \nu(t) \right) = -\eta \frac{d\nu(t)}{dt} dt - \frac{1}{m_3} F(t) dt + b(t) dw(t), \quad \eta > 0,$$

$$\text{де } -\eta = \left( 1 - \frac{1}{2\varepsilon} \gamma \right) < 0.$$

Ця умова буде виконана, якщо  $\gamma > 2\varepsilon$ . Можна взяти, наприклад,  $\gamma = 2C\varepsilon, C > 1$ .

Вимога  $\varepsilon^{0.5} M \left[ \left| \frac{d}{dt} \nu(0) \right|^2 \right] < const$ , обмеженість  $|b(t)|, \frac{1}{m_3} |F(t)|, \forall t \geq 0$  ведуть до обмеженості  $\varepsilon^{0.5} M \left[ \left| \frac{d}{dt} \nu(t) \right|^2 \right], \forall t \geq 0$ . Доведення ґрунтується на можливості точного представлення розв'язку

рівняння для  $\varepsilon^{0.5} M \left[ \left| \frac{d}{dt} \nu(t) \right|^2 \right]$ , яке отримуємо за допомогою формули Іто.

Таким чином, парадокс (самоприскорення електрона під дією власного поля) не виникає.

Підкреслимо, це модельний приклад. Стверджувати, що саме таким є вплив поля вакууму на електрон, проблематично.

**Висновки.** Сучасна теорія стохастичних рівнянь дає змогу описувати випадкові процеси обмеженої варіації, виконувати дослідження, спираючись не тільки на середні показники, а й працювати з реалізаціями процесів. Розглянуті моделі вказують на практичну цінність висновків теорії, оскільки доводять можливість використання та забезпечення вимог збереження для відкритих систем в умовах сильних збурень, навіть для систем з обмеженим числом компонент.

#### Список літератури:

1. Дубко В.А. Первый интеграл системы стохастических дифференциальных уравнений. 1978. 28 с. (Препринт 78.27. Ин-т математики АН УССР, Киев).
2. Дубко В.А. Понижение порядка системы стохастических дифференциальных уравнений с малым параметром при старшей производной. *Теория случайных процессов*. 1980. № 8. С. 35–41.
3. Дубко В.А. Вопросы теории и применения стохастических дифференциальных уравнений. Владивосток : ДВО АН СССР, 1989. 185 с.
4. Дубко В.А. Метод диффузионной аппроксимации в исследовании и построении моделей стохастических динамических систем. Владивосток : Дальнаука, 1994. 107 с.
5. Дубко В.А. Интегральные инварианты, первые интегралы и притягивающие многообразия системы стохастических дифференциальных уравнений для одного класса стохастических дифференциальных уравнений. *Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложение*. Сборник науч. труд. НАН Украины. Ин-т математики. Киев, 1998. С. 87–90.
6. Дубко В.А., Чалых Е.В. Динамика цепи конечных размеров с бесконечным числом звеньев в  $\mathbb{R}^2$ : 1998. 18 с. (Препринт. Ин-т прик. мат. ДВО РАН, Владивосток, Хабаровск: Дальнаука).
7. Дубко В.А. Моделирование динамики реальных систем. *III международная конференция «Эколого-географические проблемы природопользования нефтегазовых регионов Нижневартовск»*: Сборник докл. НГГУ. 2006. С. 16–20.
8. Дубко В.А., Карачанская Е.В. Классификация и моделирование случайных гармоничных процессов на основе SHCS = рядов. *Математические заметки ЯГУ*. 2011. Т. 18.1. С. 36–54.
9. Дубко В.А. Уравнения Ланжевена согласованные с классическими и неклассическими моделями диффузии. *Вісник АМУ, серія «Техніка»*. 2015. Вип. 2(10). С. 34–46.
10. Дубко В.А. Ободной модели диффузии с постоянной скоростью. *Математические заметки СВФУ*. 2019. Т. 25.1. С. 31–44.
11. Дубко В.А., Зубарев С.Н., Карачанская Е.В. Построение решения характеристического уравнения для модели диффузии Ланжевена с ортогональными возмущениям, 2021. 11 с. URL: <https://arxiv.org/pdf/2102.07496.pdf>
12. Ильин Л.Н., Хасминский Р.З. Об уравнениях броуновского движения. *Теория вероятностей и ее применение*. 1964. Т. 91. С. 466–491.
13. Кац М. Несколько вероятностных задач физики и математики. Москва : «Наука», 1967. 176 с.
14. Климонтович Ю.Л. К статистическому обоснованию уравнения Шредингера. *ТМФ*. 1993. Т. 97, № 1. С. 3–26.
15. Климонтович Ю.Л. Нелинейное броуновское движение. *УФН*. 1994. Т. 164. № 8. С. 811–844.
16. Колесник А. Д., Турбин А. Ф. Симметричные случайные эволюции в  $\mathbb{R}^2$ . *Докл. АН Украины*. 1990. № 2. С. 10–11.
17. Ланжевен П. Избранные труды. Москва : Изд-во АН СССР Наука. 1964. 567 с.



18. Лоренц Г.А. Теория электронов и ее применение к явлениям светового и теплового излучения. Москва : Гл.-лит. технико-теоретической лит. 1953. 370 с.
19. Орсингер Э., Колесник А. Точное распределение в модели случайного движения на плоскости, управляемого гиперболическим уравнением четвертого порядка. *Теор. вероятн. и ее примен.* 1996. Т. 41. № 2. С. 451–459.
20. Скороход А.В. Об усреднении стохастических уравнений математической физики. *Проблемы асимптотической теории нелинейных колебаний.* Киев : Наук. думка, 1977. С. 196–208
21. Скороход А.В. Стохастические уравнения системы многих частиц. *Математические методы в биологии.* Киев : Наук. думка. 1977. С. 38–53.
22. Турбин А.Ф. Одномерный процесс броуновского движения – альтернатива модели А. Эйнштейна – Н. Винера – П. Леви. *Фрактальный анализ та суміжні питання.* 1998. № 2. С. 47–60.
23. Хасминский Р.З. О принципе усреднения для стохастических дифференциальных уравнений Ито. *Kybernetika, Clcloboa* 3, 1968. Т. 4. С. 260–279.
24. Francisco J. Sevilla, Luis A. Gomez N. Theory of diffusion of active particles that move at constant speed in two dimensions. *Phys. Rev. E* 90, 022130. Published 25 August 2014.
25. E. Orsinger, R. Garra and A. I. Zeifman. Cyclic random motions with orthogonal directions (2019). URL: <https://arxiv.org/pdf/1912.12625.pdf>

### Doobko V.A. NON-CLASSICAL MODELS OF STOCHASTIC DYNAMICAL SYSTEMS

*The article considers models of random processes that differ from traditional ones. The scope of their application in modeling real processes, phenomena and systems, taking into account the requirement of limited variation of processes. The modern theory of stochastic differential equations provides a possibility to model stochastic processes of bounded variation not only on average but also on their realizations. This possibility is demonstrated on the example of an oriented chain fixed at an initial point. The formulated theorem shows the connection between discrete and continuous chain models. Examples of the appearance of first integrals for stochastic systems are given and the possibility of stability of the attracting manifold is indicated. The importance and examples of the application of the Langevin principle in the construction of equations of stochastic dynamics are emphasized. For the Langevin model of dynamics of a Brownian particle with orthogonal random effects to its velocity, in the mode when the modulus of initial velocity of the particle is on a manifold which is, as was found earlier, attractive, the equation for the density of particle distribution is given. The peculiarities of behavior of solutions of this equation depending on the relation between the coefficient of Stokes friction and under Wiener perturbations orthogonal to the velocity are considered. The presence of oscillatory processes for an ensemble of particles is noted. An explicit solution for the characteristic function for the particle position density is presented. It is shown that the spectrum of a characteristic function contains areas of continuous values representing an oscillatory process and an area with no oscillations. These results support the conclusion that the model of the dynamics Brownian particle constructed on the basis of the unconventional physical interpreting of the Langevin equations, as stochastic equations with orthogonal influences, leads to the treatment of the ensemble of Brownian particles as a system possessing wave properties. The role of the choice of the type of the stochastic differential equation, in particular Stratonovich rather than Ito, is demonstrated on the example of exclusion, related to the mathematical model of Lorenz, the paradox of self-acceleration of the electron interacting with its own field.*

**Key words:** limited variations, model of Lorenz, stochastic equation, orthogonal influences, oriented chain.

**Д'яченко Л.І.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Глін А.В.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Шумиляк Л.М.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Газдюк К.П.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Тарновецька О.Ю.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

## ОГЛЯД ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ТА МЕТОДОЛОГІЙ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕСТУВАННЯ

*У цій роботі розглянуто методи автоматизованого тестування програмного забезпечення, досліджено прийоми та інструменти для створення автоматизованих тестів та надано рекомендації стосовно доцільності застосування тих чи інших інструментів для тестування різних типів програмного забезпечення. Розглянуто платформи з відкритим кодом NUnit, що розроблена для написання та запуску тестів мовами програмування Microsoft.NET, xUnit – це загальна назва для кількох модулів тестування, які виводять свою структуру та функціональність із SUnit Smalltalk та тестове рішення для автоматизації.NET SpecFlow, яке побудоване на парадигмі BDD (Behavior Driven Development). Описано переваги використання Selenium WebDriver для автоматизації тестування вебдодатків та розглянуто системи для відображення результатів тестування, а саме: ExtentReports – це бібліотека звітів для автоматизованих тестів та Allure Framework – це гнучкий полегшений багатомовний інструмент звіту про тестування.*

*З метою оцінки правильності поданих рекомендацій було розроблено програмне забезпечення для автоматизації тестових сценаріїв спеціалізованого програмного забезпечення, створений макет для написання дефект-репортів та тестових сценаріїв. Основним завданням системи є аналіз ефективності використання автоматизованого тестування для перевірки якості програмного забезпечення. Система показує, як можна заощадити час тестування, використовуючи автоматизовані тести. Технології тестових рушіїв NUnit та XUnit було використано для запуску тестів та механізму перевірки даних. Розроблене ПЗ покриває тестами вебдодаток за допомогою інтеграційного, UI- та API-тестування. Система показала значне заощадження часу тестування (ми отримали реальне скорочення часу, витраченого на виконання тестування у шість разів), використовуючи автоматизовані тести та виконуючи їх паралельно.*

**Ключові слова:** автоматизоване тестування, Selenium WebDriver, тестові сценарії, дефект-репорт, інтеграційне тестування.

**Постановка проблеми.** Автоматизація тестування – це техніка тестування програмного забезпечення, яка використовує спеціальні програмні засоби для виконання набору тестів. Ручне тестування проводиться людиною, яка ретельно виконує кожен етап тестування, використовуючи створені раніше тестові сценарії.

Програмне забезпечення для автоматизації цих процесів може вводити дані в систему, що підлягає тестуванню, порівнювати очікувані з фактичними

результатами та генерувати докладні звіти. Автоматизація випробувань вимагає значних вкладень як коштів, так й інших ресурсів.

Послідовні цикли розробки часто вимагають виконання одного і того ж набору тестів неодноразово. За допомогою інструментів автоматизації тестування можна записати цей набір тестів і повторно відтворити його за необхідності. Після автоматизації набору тестів втручання людини не потрібне. Метою автоматизації є зменшення кіль-

кості тестових сценаріїв для запуску вручну, а не взагалі усунення ручного тестування.

Автоматизація тестування – найкращий спосіб підвищити його ефективність, охоплення тестом і швидкість виконання окремих тестових сценаріїв у процесі тестування програмного забезпечення.

Нині є різні підходи до автоматизації тестування [1, с. 35, 54]. Комплексна стратегія тестування включає в себе три рівні автоматизації:

1) рівень модульного тестування (Unit Tests Layer) – компонентні тести, що зазвичай пишуться розробниками;

2) рівень функціонального тестування (Functional Test Layer, or Service/API Tests Layer) – тестування через доступ до функціонального шару, не беручи до уваги призначений для користувача інтерфейс;

3) рівень тестування інтерфейсу користувача (GUI Test Layer) дає змогу тестувати не тільки сам інтерфейс користувача, а й реалізовувати функціональне тестування, виконуючи операції, що використовують бізнес-логіку програми.

Для забезпечення найкращої якості додатку рекомендується автоматизувати всі три рівні. Тести верхнього рівня (тестування інтерфейсу) вважаються більш складними та дорогими в розробці. Співвідношення може змінюватися залежно від специфіки тестованого продукту.

Автоматизація тестування програмних продуктів через графічний інтерфейс користувача набирає нині дедалі більшої популярності. І це не дивно, оскільки тільки в цьому разі додаток буде протестовано тим же способом, яким він буде використовуватися кінцевими користувачами. Плюсами такого виду тестування є те, що тестування відбувається на реальних пристроях із різною конфігурацією, різними операційними системами, в різних браузерах.

До мінусів цього виду автоматизованого тестування можна зарахувати те, що тести проходять довго, багато зусиль витрачається на їх підтримку (при зміні інтерфейсу потрібне внесення змін у всі тести, які використовують оновлені елементи), тести можуть бути нестабільними (можуть «падати» через спроби звернутися до елементів інтерфейсу, які ще не завантажилися, нестабільно працювати з конфігураціями пристроїв для запуску тестів, відмінними від тієї, на якій тести створювалися).

Реалізується такий вид автоматизації через використання спеціалізованих інструментів, які дають змогу спілкуватися з інтерфейсом програми, що тестується [2].

Data-driven testing – тестування на основі даних – це метод тестування програмного забезпечення, при якому дані тестування зберігаються у форматі таблиці або таблиць. Кероване даними тестування дає змогу запускати один скрипт, що виконує сценарії для усіх даних із таблиць, та очікувати виведення результатів у тій самій таблиці. Цей метод також називають тестуванням на основі таблиць, або параметризованим тестуванням.

Data Driven Framework – це система автоматизації тестування, в якій вхідні значення зчитуються з файлів даних і зберігаються у змінних у тестових скриптах. Це дозволяє тестувальникам об'єднувати як позитивні, так і негативні тести. Вхідні дані в структурі, керованій даними, можуть зберігатися в .xls, .xml, .csv файлах та базах даних.

Keyword-based testing – це техніка сценаріїв, яка використовує файли даних, що містять ключові слова, пов'язані з тестованою програмою. Ці ключові слова описують набір дій, необхідних для виконання певного кроку.

Тест, керований ключовими словами, складається з ключових слів високого та низького рівня, включаючи аргументи ключових слів. Він складається для опису дії тестового випадку. Цей метод також називається тестуванням на основі таблиці або тестуванням на основі дії [2].

Задля продуктивної роботи треба вибрати зручний для автоматизації інструмент. Правильний вибір інструменту є, як правило, складним завданням. По-перше, слід визначити вимоги, вивчити різні інструменти та їх можливості, встановити очікування від цього інструмента та перейти до підтвердження концепції.

Існує велика кількість додатків для автоматизації тестування, такі як: HP LoadRunner, HP QuickTest Professional, HP Quality Center; Segue SilkPerformer; IBM Rational FunctionalTester, IBM Rational PerformanceTester, IBM Rational TestStudio;

За допомогою цих додатків та інструментів тестувальник може:

- встановити продукт;
- створити тестові дані;
- взаємодіяти з GUI;
- визначити проблеми.

Проте не варто забувати, що автоматизоване тестування не може повністю замінити ручне, адже це затратний процес, який вимагає багато ресурсів.

Нині багато проектів визнають переваги автоматизованого тестування, можливість збільшення

покриття тестами, яке зменшить час на регресивне тестування.

Наразі є великий вибір утиліт і фреймворків, які можуть значно полегшити та автоматизувати процес тестування [3, с. 125, 215].

**Постановка завдання.** У статті буде більш детально розглянуто та проаналізовано програмні засоби, вибрані для реалізації системи автоматизованого тестування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** NUnit – це платформа з відкритим кодом, розроблена для написання та запуску тестів мовами програмування Microsoft.NET.

У NUnit тести можна запускати постійно, також є можливість одночасного запуску кількох тестів. Результати видаються негайно. Ніяких суб'єктивних суджень людини або тлумачень результатів тесту не потрібно. Простота фреймворку дає змогу легко виправити помилки в міру їх виявлення.

NUnit використовує різноманітні атрибути задля впровадження своєї функціональності в тестові класи й методи. До основних атрибутів можна зарахувати такі:

- TestFixture – клас, який містить тестові методи;
- Test – метод у тестовому класі. Цей метод перетворюється на тест і починає відображатись у тест-провіднику;
- SetUp – метод, позначений атрибутом, виконується безпосередньо перед кожним тестом;
- TearDown – метод, позначений цим атрибутом, буде виконуватись після кожного тестового методу;
- Repeat – метод має бути виконаний кілька разів;
- Order – метод має бути виконаний у відповідному порядку.

xUnit – це загальна назва для кількох модулів тестування, які виводять свою структуру та функціональність із SUnit Smalltalk. Назви багатьох фреймворків є варіацією “SUnit”, зазвичай замінюючи “S” першою літерою (або літерами) в назві передбачуваної ними мови (“JUnit” для Java, “RUnit” для R тощо). Ці фреймворки та їх загальна архітектура в сукупності відомі як “xUnit” [4, с. 340].

SpecFlow – це тестове рішення для автоматизації .NET, побудоване на парадигмі BDD (Behavior Driven Development). SpecFlow використовується для визначення, управління та автоматичного виконання зручних для читання тестів прийняття в проєктах .NET (Full Framework та .NET Core).

Тести SpecFlow пишуться з використанням технології Gherkin, що дає змогу писати тестові сценарії на зрозумілій мові. SpecFlow використовує офіційний парсер Gherkin, який підтримує понад 70 мов. Потім ці тести прив'язуються до коду вашої програми за допомогою так званих прив'язок, що дозволяє виконувати тести, використовуючи вибрану систему тестування. Також можна виконувати тести за допомогою власного спеціалізованого тестового рушія SpecFlow, SpecFlow + Runner.

Selenium WebDriver – це зручний інструмент, за допомогою якого зручно автоматизувати програмне забезпечення з відкритим кодом. Selenium WebDriver – це колекція API з відкритим кодом, які використовуються для автоматизації тестування вебдодатків [4, с. 451].

Структура взаємодії Selenium WebDriver з бібліотеками мов програмування показана на рис. 1.

Засіб Selenium WebDriver використовується для автоматизації тестування вебдодатків. Він підтримує багато браузерів, таких як Firefox, Chrome, IE та Safari. Однак, використовуючи Selenium WebDriver, можна автоматизувати тестування лише для вебдодатків. Він не відповідає вимогам для віконних програм.

Selenium WebDriver також підтримує різні мови програмування, такі як C#, Java, Perl, PHP та Ruby для написання тестових скриптів. Selenium WebDriver не залежить від платформи, оскільки один і той же код може використовуватися в різних операційних системах, таких як Microsoft Windows, macOS та Linux. Це один із компонентів сімейства Selenium, який також включає Selenium IDE, Selenium API та Selenium Grid.

Selenium WebDriver не обробляє компонент вікна, але це обмеження можна подолати, використовуючи зовнішні інструменти, такі як AUTO IT tool, Sikuli тощо. Він має різні стратегії розташування, такі як ID, Ім'я, Текст посилання, Частковий текст посилання, Назва класу, Селектор CSS та Xpath. WebDriver також має кращу підтримку динамічних вебсторінок, таких як Ajax, де елементи вебсторінки можуть змінюватися без перезавантаження самої сторінки. Використовуючи різні jar-файли, ми також можемо тестувати API, проводити тест бази даних тощо, використовуючи Selenium WebDriver.

Там, де це можливо, WebDriver використовує власну функціональність рівня операційної системи, а не команди JavaScript на основі браузера для керування браузером. Це обходить проблеми з

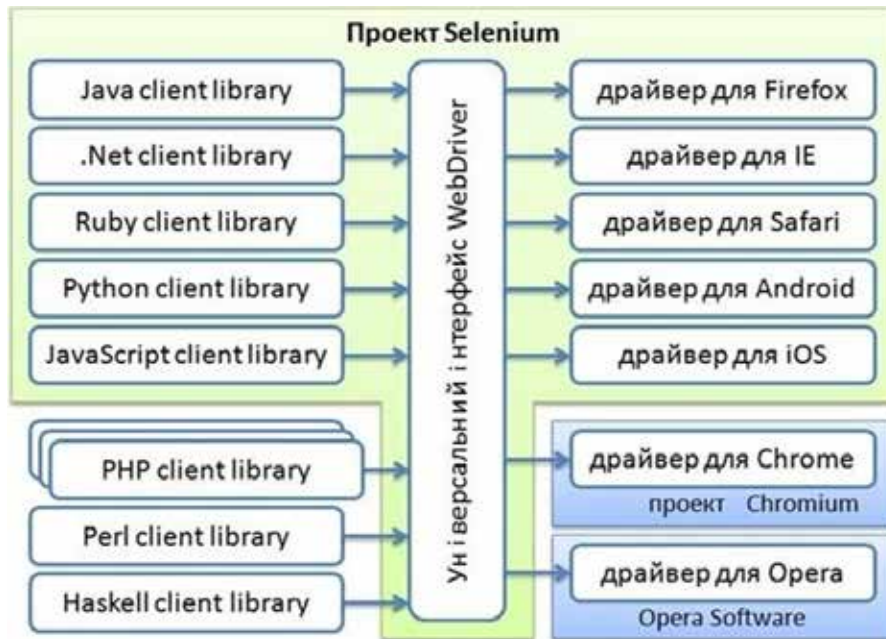


Рис. 1. Структура взаємодії Selenium WebDriver із бібліотеками мов програмування

незначними відмінностями між власними командами та командами JavaScript, включаючи обмеження безпеки.

Selenium 2.0 має на меті надати базовий набір будівельних блоків, з яких розробники можуть створити власну мову для конкретного домену (DSL). Один із таких DSL вже існує: проект Watir на мові Ruby має багату історію гарного дизайну. Watir-webdriver реалізує API Watir як обгортку для Selenium WebDriver в Ruby. Watir-webdriver створюється повністю автоматично на основі специфікації WebDriver та специфікації HTML [5, с. 181].

За своїми ознаками Selenium WebDriver є специфікацією програмного інтерфейсу для управління браузером, референтними реалізаціями цього інтерфейсу для кількох браузерів, набором клієнтських бібліотек для цього інтерфейсу кількома мовами програмування.

WebDriver дає змогу використовувати мову програмування на ваш вибір під час розробки тестів.

Єдиними недоліками WebDriver є те, що він не має вбудованих команд для автоматичного формування результатів тесту.

Cross Browser Testing – це тип функціонального тестування для перевірки того, чи працює вебпрограма належним чином у різних браузерах.

Якщо використовується Selenium WebDriver, то можна автоматизувати тестові кейси за допомогою браузерів Internet Explorer, FireFox, Chrome, Safari. Для одночасного виконання тестових сце-

наріїв із різними браузерами на одній машині можна інтегрувати фреймворк TestNG із Selenium WebDriver.

Крос-браузерне тестування – це техніка тестування вебдодатків за допомогою різних веб-браузерів. Selenium може підтримувати різні типи браузерів для автоматизації. Він може бути інтегрований із TestNG для проведення мульти-браузерного тестування. З параметрів у testing.xml передається ім'я браузера, а в тестовому сценарії можна створити посилання на WebDriver відповідно.

Різні веббраузери дотримуються стандартів Open Web, але вони мають власні інтерпретації. Оскільки кожен із них відображає HTML, CSS та JavaScript унікальними способами, ретельного налагодження вихідного коду вебсайту недостатньо, щоб гарантувати, що сайт буде виглядати та поводитись так, як передбачалося в різних браузерах (або різних версіях одного браузера).

Веброзробникам доводиться абстрагувати відмінності браузера. Перехресне тестування сумісності браузерів допомагає в цьому, визначаючи помилки сумісності для браузера, щоб їх можна було швидко налагодити. Це допомагає гарантувати, що вебсайт не відчужує значну частину своєї цільової аудиторії просто тому, що вебсайт не працює в операційній системі браузера.

Нижче наведено найкращі практики, яких слід дотримуватися під час проведення тестування в кількох браузерах за допомогою Selenium.

Варто вибирати бібліотеки та фреймворки обережно. Перш ніж приступати до розробки, потрібно знати, що найновіші фреймворки CSS можуть допомогти створити яскравіший та динамічний інтерфейс користувача, але вони можуть бути несумісними з кожним браузером, оскільки кожен із них має певний механізм візуалізації. Перш ніж використовувати найновіші бібліотеки або фреймворки CSS або JS, варто прочитати інструкції щодо браузера, щоб визначити, чи підтримують вони ці бібліотеки та фреймворки.

Використання належних бібліотек та програм для запуску завдань JavaScript відіграє важливу роль у розробці вебдодатків, тому дуже важливо використовувати правильні ресурси JavaScript, які відповідають вимогам сайту та пропонують сумісну підтримку браузера.

Є безліч інструментів JavaScript на вибір. Grunt та Gulp виділяються тим, що їх можна автоматизувати відповідно до вимог. Вони також покращують загальну продуктивність програми, забезпечуючи компіляцію, підключення та інші функції, які покращують якість коду після компіляції [6, с. 145, 184].

Служби контролю якості мають вирішити, в яких браузерах та операційних системах сайт має бути протестований. Кожен браузер має кілька версій, а деякі браузери навіть оновлюються постійно – принаймні, раз на місяць. Таким чином, необхідно перевірити, який браузер, версії браузера та ОС необхідні для крос-браузерного тестування за допомогою Selenium. Пріоритетними є комбінації, які, ймовірно, використовуватимуть найбільші сегменти цільової аудиторії.

Internet Explorer не підтримує розширені стилі та фреймворк CSS. Є ймовірність, що багато елементів дизайну сайту будуть спотворені при доступі через IE. Щоб виправити це, варто створити окрему таблицю стилів для IE. InternetExplorerDriver – реалізація WebDriver для браузера Internet Explorer.

Проведення крос-браузерного тестування за допомогою Selenium є надзвичайно важливим, оскільки воно забезпечує сумісність вебдодатків та забезпечує надійну взаємодію з користувачем. Користувач може вибрати будь-який браузер. Це може бути Google Chrome, Safari або Opera Mini. Наприклад ви, як розробник, користуєтесь Google Chrome. Оскільки ви розробляєте вебсайт, який стосується Chrome, він буде правильно відображатись у браузері. Але коли ви публікуєте сайт, то припускаєте, що кожен із ваших користувачів використовує Google Chrome. Потрібно пам'ятати,

що Google Chrome має 62% частку в статистиці браузерів. Отже, ви просто втратили 38% своїх користувачів, навіть не давши їм змогу побачити продукт [7, с. 189, 210].

ExtentReports – це бібліотека звітів для автоматизованих тестів. Logger – це просто об'єкт для реєстрації повідомлень або подій для певної системи чи програми. ExtentReports використовує стиль ведення журналу, щоб додати інформацію про тестові сесії, такі як створення тестів, додавання знімків екрана, призначення тегів та додавання подій або серії кроків.

Усі методи в ExtentReports є багатопотоковими. Рекомендованим використанням є підтримка одного екземпляра об'єкта ExtentReports для тестового сеансу.

Allure Framework – це гнучкий полегшений багатомовний інструмент звіту про тестування, який не лише демонструє стислий опис про те, що було перевірено у формі вебзвіту, але дозволяє кожному, хто бере участь у процесі розробки, отримати максимум корисної інформації із щоденного виконання тестів.

З позиції програмістів та тестувальників звіти Allure скорочують загальний життєвий цикл дефектів: невдачі тесту можна розділити на помилки та непрацюючі тести, а також журнали, кроки, пристосування, вкладення, історію та інтеграцію з TMS та системами відстеження помилок, тому відповідальні розробники та тестувальники матимуть всю інформацію під рукою [8, с. 214].

З позиції менеджерів Allure дає чітке уявлення про те, які особливості були висвітлені, де згруповані дефекти, як виглядає графік виконання та багато інших зручних речей. Модульність та розширюваність Allure гарантують, що завжди можна щось налаштувати, щоб зробити використання Allure зручним для користувача.

### **Практичне застосування інструментів для автоматизованого тестування ПЗ**

Для перевірки доцільності автоматизації тестування програмних продуктів було створено власний фреймворк, що автоматизує тестування спеціалізованого програмного забезпечення.

Основним завданням системи є аналіз ефективності використання автоматизованого тестування для перевірки якості програмного забезпечення. Система показує, як можна заощадити час тестування, використовуючи автоматизовані тести та виконуючи їх паралельно.

Технології тестових рушіїв NUnit та XUnit було використано для запуску тестів та механізму перевірки даних. Використання цих двох технологій

також обґрунтовується порівнянням їхньої імплементації. XUnit запускає всі тестові скрипти одразу в паралельному режимі, що є не дуже зручним для автоматизованого тестування, але ідеально підходить для тестування модулів. XUnit не містить тестового прогресу та контексту (додаткова інформація впродовж виконання тесту), через що в подальшому важко відслідкувати причину падіння тестового сценарію. NUnit своєю чергою запускає тести в послідовному режимі, але містить багато різних конфігураційних можливостей для запуску тестових сценаріїв у різних режимах послідовності виконання та поділу їх на тестові набори.

SpecFlow використовується для наочного опису методології BDD (Behavior Driven Development), яка своєю чергою заохочує співпрацю між усіма, хто бере участь у розробці ПЗ: розробниками, тестувальниками та представниками бізнесу, такими як власники продуктів або бізнес-аналітики. Процес тестування був побудований саме на основі методології BDD оскільки за її допомогою було створено тестові сценарії та скрипти, написані не тільки за допомогою коду, але й за допомогою ключових фраз мовою Gherkin, які є зрозумілими для всіх зацікавлених сторін.

UI-тестування полягає в імітації роботи користувача з тестованим продуктом. Із цією метою було використано Selenium та Selenium Web Driver, який є портативним фреймворком для тестування вебдодатків. Його перевагами є підтримка багатьох мов програмування (наприклад C#, Groovy, Java, Perl, PHP, Python, Ruby та Scala) та можливість взаємодії з вебелементами вебсторінки для крос-браузерного тестування.

POM (Page Object Model) – це шаблон дизайну, що створює сховище об'єктів для елементів вебінтерфейсу. Згідно з цією моделлю, для кожної вебсторінки у програмі має бути відповідний клас сторінки. У цій роботі цей клас сторінки визначає елементи цієї вебсторінки, а також містить методи, які виконують операції з цими елементами. Це дало змогу зменшити дублювання коду та полегшило технічне обслуговування. POM є основою автоматизованого UI-тестування.

Extended Web Driver – це своєрідна обгортка Selenium Web Driver для кастомізації будь-яких дій та елементів, яка приховує роботу з Selenium, що допоможе швидкій зміні інструменту для автоматизації вебсторінок.

Для відображення звіту тестових сценаріїв було використано Allure Framework та Extent Report Framework. Ці інструменти не тільки демонструють стисле уявлення про те, що було

протестовано в формі вебзвіту, але дозволяють кожному, хто бере участь у процесі розробки, отримати максимум корисної інформації з повсякденного виконання тестів.

Іншим типом тестування, яке було розглянуто, є API-тестування. Це тип тестування програмного забезпечення, який перевіряє Application Programming Interface (API). Метою тестування API є перевірка функціональності, надійності, продуктивності та безпеки інтерфейсів програмування. Під час тестування API замість використання стандартних засобів введення/виведення використовується програмне забезпечення для надсилання викликів до API, отримання вихідних даних та записування реакції системи. В основному API-тестування концентрується на рівні бізнес-логіки архітектури програмного забезпечення. У цій роботі для тестування API використовується інструмент RestSharp, який своєю чергою є найпопулярнішою клієнтською бібліотекою HTTP для .NET. Зручними функціями, які відділяють RestSharp від інших технологій і є причиною застосування цього інструменту, є автоматична серіалізація та десеріалізація, виявлення типів запитів і відповідей та різноманітність автентифікацій.

Важливою частиною тестування є підготовка тестових даних, яка має бути швидкою та зручною. Для підготовки тестових даних використовується робота з базою даних, а саме технологія Entity Framework. Це набір технологій в ADO.NET, які підтримують розробку орієнтованих на дані програмних додатків. Іншою ціллю застосування Entity Framework є перевірка записів у БД, оскільки ця технологія спрощує роботу з БД і виключає потребу в будь-яких інших адаптерах для підключення до БД.

Структура розробленого фреймворку подана на рис. 2.

Як видно з рис. 2, програмне забезпечення спроектовано на основі компонентів логіки, які своєю чергою використовують БД, модулі NUnit та Selenium Web Driver.

Під час запуску звіту у html-форматі ми бачимо всю інформацію про виконання тестів:

- відображення кількості тестів, які пройшли чи провалилися;
- відображення кількості кроків, які пройшли чи провалилися;
- відображення відповідної інформації у вигляді кругової діаграми;
- інформація про початок, кінець та час виконання тестів;

У разі натискання на певний розділ відображаються тести з цього розділу.

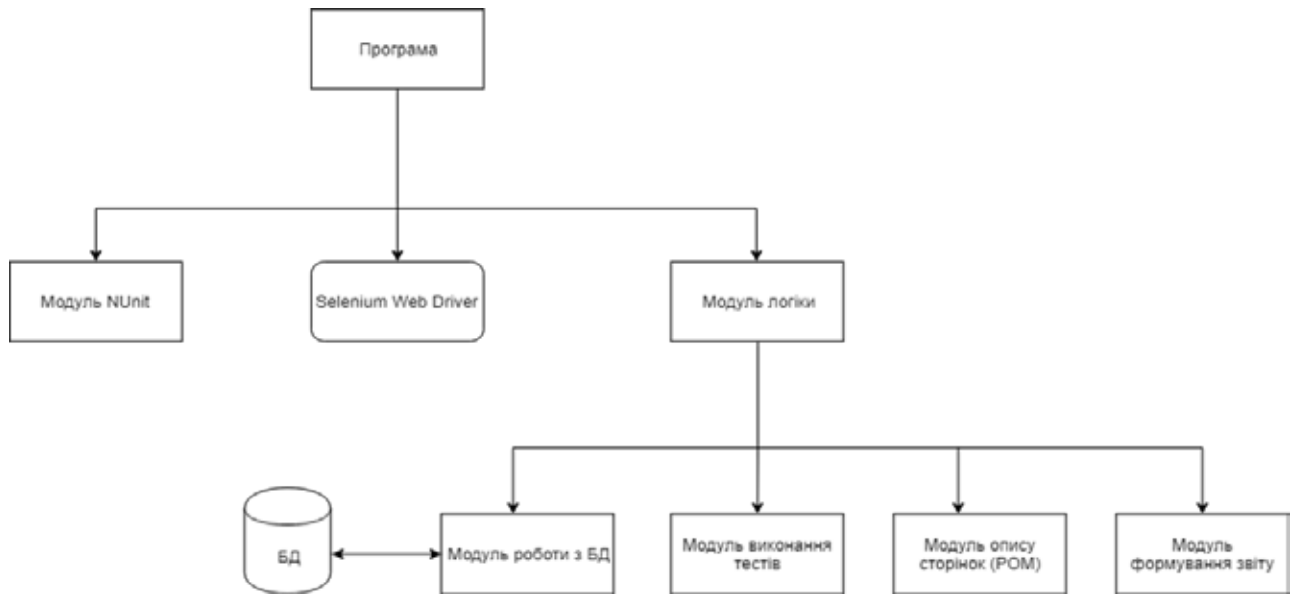


Рис. 2. Загальна структура фреймворку

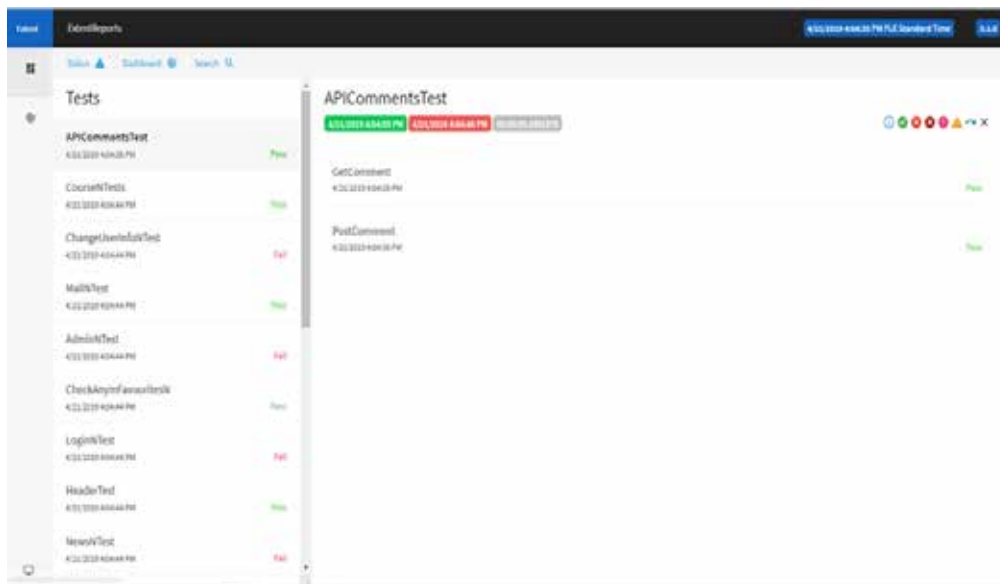


Рис. 3. Графічне відображення звіту

**Результати дослідження.** У цьому розділі представлені результати порівняння швидкості тестування ПЗ із використанням розробленого фреймворку та за допомогою ручного тестування.

Таблиця 1

**Результати часових витрат на тестування розробленого ПЗ**

Вид тестування	Затрачений час (год.)
Ручне тестування	18
Автоматизоване тестування (з використанням розробленого фреймворку)	3

Як бачимо, ми отримали реальне скорочення часу, затраченого на виконання тестування у шість разів. Хоча варто зазначити, що інструменти автоматизованого тестування, а також навчання їх використанню коштують недешево, тому треба ретельно оцінювати бюджет. Для виконання ручного тестування не треба створювати додаткових програмних інструментів та витратити на це ресурси. Але сам час виконання тестових сценаріїв вручну досить довгий. Певні види тестування взагалі неможливо здійснити за допомогою ручного методу, наприклад, тестування навантаження (не можна змодельовати велику кількість користувачів вручну).



Також до недоліків автоматизованого тестування часто зараховують відсутність «людського погляду». Можливе існування помилок, які помітить тільки людина.

Автоматизоване тестування не рекомендується використовувати для програмних продуктів, які часто змінюються. Тестувальникам доведеться витратити багато часу на написання нових інструментів та модернізацію існуючих. В той час, як із ручним тестуванням, незначні зміни можуть бути досліджені відразу, без написання коду і його виконання.

Взагалі для тестування більшості реальних проектів використовують комбінацію обох видів тестування, що дає змогу отримати від тестування максимальний результат.

**Висновки.** У процесі цього дослідження було визначено, що автоматизація тестування використовується для автоматизації повторюваних завдань та інших завдань тестування, які важко або ресурсозатратно виконувати вручну. Автоматизація тестування – вагоме питання, яке постійно

вдосконалюється в сьогоdnішньому світі та має багато переваг: зменшення часових затрат на тестування; спрощення процесів формування звітності та багато іншого.

Також було проаналізовано особливості та властивості тестування web-додатків. Внаслідок аналізу для автоматизації тестування більшості вебпроектів рекомендується використовувати Selenium WebDriver, адже цей продукт має багато переваг порівняно з аналогами, практичний у застосовуванні та може використовуватися разом із великою кількістю мов програмування.

Для оцінки правильності поданих рекомендацій було розроблено програмне забезпечення для автоматизації тестових сценаріїв спеціалізованого програмного забезпечення, створений макет для написання дефект репортів та тестових сценаріїв. Розроблене ПЗ покриває тестами вебдодаток за допомогою інтеграційного, UI- та API-тестування. Система показала значне заощадження часу тестування, використовуючи автоматизовані тести та виконуючи їх паралельно.

### Список літератури:

1. Майерс Г., Баджет Т., Сандлер К. Мистецтво тестування програм. Москва, 2012. 270 с.
2. Автоматизоване тестування web-додатків. Київ, 2010. URL: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-b217/informatics-computer-science-and-automation-b217/29858-b217-014>. (дата звернення: 20.01.2021).
3. Кріспін Л., Грегорі Д. Гибкое тестирование: практическое руководство для тестировщиков ПО и гибких команд. Москва, 2011. 463 с.
4. Липаев В.В. Тестирование компонентов и комплексов программ : підручник. Москва-Берлін, 2015. 528 с.
5. Азарский К.И. Тестирование. Легкий старт. Москва, 2014. 226 с.
6. Бейзер Б.В. Тестирование черного ящика. Технологии функционального тестирования программного обеспечения и систем. Санкт-Петербург, 2012. 318 с.
7. Copeland L. A Practitioner's Guide to Software Test Design. London, 2013. 238 с.
8. Whittaker J.A. Exploratory Software Testing. Boston, 2011. 253 с.

### **Diachenko L.I., Ilin A.V., Shumylyak L.M., Hazdiuk K.P., Tarnovetska O.Yu. SOFTWARE AND METHODOLOGIES FOR THE IMPLEMENTATION OF AUTOMATED TESTING SYSTEMS**

*This paper discusses the methods of automated software testing, explores techniques and tools for creating automated tests and provides recommendations on the feasibility of using certain tools for different types of software testing. There are considered some automated platforms for software testing: NUnit open-source platforms that was designed to write and run tests in Microsoft.NET programming languages, xUnit is a common name for several testing modules that derive their structure and functionality from SUnit Smalltalk and a test solution for.NET – SpecFlow automation, which built on the paradigm of BDD (Behavior Driven Development). The benefits of using Selenium WebDriver to automate web application testing are described, and systems for displaying test results are discussed. We described ExtentReports – a report library for automated tests and Allure Framework – a flexible, easy-to-use multilingual test report tool.*

*To assess the correctness of the submitted recommendations, software for test automation of specialized software was developed, a layout for writing defect reports and test scenarios was created. The main task of the system is to analyze the effectiveness of the automated testing usage for verifying the software quality. The system shows how you can save testing time using automated tests. NUnit and XUnit test engine technologies were used to run the tests and the data validation mechanism. The developed software covers the web application with tests using integration, UI and API testing. The system showed significant savings in testing time (we obtained a real reduction in the time spent on testing in six times.), using automated tests and running them in parallel.*

**Key words:** *automated testing, Selenium WebDriver, test scenarios, defect report, integration testing.*

**Жуковський В.Р.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ

*Перші опалювальні системи з'явилися ще в Стародавньому Римі, а тепер їхні вдосконалені аналоги доступні всім і кожному. Для забезпечення безперебійної подачі гарячої води й опалення приміщень сьогодні використовують різне спеціалізоване обладнання. Останнім часом особливу популярність мають водогрійні котли. Вони вирізняються підвищеним терміном служби та чудовою якістю подачі води. Крім того, вони досить прості в установці й обслуговуванні.*

*Основне призначення водогрійного котла полягає в якісному та швидкому нагріванні води, яка використовується для найрізноманітніших потреб. Перш за все – для опалення приватних будинків, гарячого водопостачання, а також для опалення промислових і громадських будівель і споруд. Ефективна робота та пристрій водогрійного котла безпосередньо пов'язані між собою.*

*Устаткування більшої частини теплових станцій використовується 10-20 і більше років, його фізичний ресурс вичерпано, воно морально застаріло. Найліпшим рішенням у цій ситуації є вдосконалювання повномасштабних інтегрованих автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП) замість застарілих систем, а також впровадження актуального технологічного обладнання, що дає змогу максимально використовувати можливості систем управління й, відповідно, домогтися якісно нового рівня технології.*

*У роботі досліджується проблема регулювання водогрійних котлів та обґрунтовується, чому варто впроваджувати автоматичну систему регулювання навантаження водогрійних котлів.*

*Також досліджується розроблення автоматичної системи регулювання навантаження водогрійних котлів, яка дає змогу підтримувати навантаження регулюванням тепловими параметрами, та було побудовано мнемосхему автоматичної системи управління навантаженням водогрійного котла за допомогою SCADA системи TRACE MODE, саме ця програма була обрана через свою розширену функціональність.*

**Ключові слова:** автоматична система регулювання, система теплопостачання, збурення, котел, навантаження.

**Постановка проблеми.** Сьогодні переважна більшість опалювальних систем у сучасних житлових і промислових споруд обігрівается за допомогою водогрійних котлів, які відрізняються від інших джерел генерування теплової енергії чудовою якістю подачі води та водночас значним терміном експлуатації. Не меншою є роль водогрійних котлів і для потреб гарячого водопостачання та опалення приватних будинків. Проте в процесі нагріву води до необхідної температури та її подальшого підтримання на необхідному рівні виникає потреба тепловтрат. Окрім того, моральна та технічна зношеність значної частини водогрійних котлів, більшість з яких було введено в експлуатацію ще в радянські часи, змушує спеціалістів шукати способи більш якісного управління технологічним процесом. Тому одним із найоптимальніших рішень цієї проблеми є впровадження АСУ – автоматизованої системи

управління технологічним процесом водогрійних котлів, що дасть можливість ефективно використати всі наявні можливості системи нагріву й опалення, а також зекономити значні гроші й запобігти тепловтратам.

**Постановка завдання.** Мета статті – проаналізувати особливості обґрунтування та впровадження автоматичної системи регулювання навантаження водогрійних котлів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Водогрійні котли сьогодні справедливо мають велику популярність серед населення, до того ж їхня загальна кількість невинно зростає. Проте головною проблемою їх експлуатації є неправильне регулювання основних параметрів технологічного процесу, оскільки навіть за найменших відхилень від базових показників тиску, температури, об'єму води та кількох інших важливих даних ефективність використання водогрійного

котла суттєво знижується. Як указують [3, с. 25; 5, с. 105; 4, с. 45], основними проблемами цього явища варто назвати такі:

1) значне перевищення експлуатаційного терміну більшості водогрійних котлів, особливо в промислових спорудах і житлових багатоквартирних будинках;

2) зниження кваліфікації персоналу, який обслуговує водогрійні котли, особливо у віддалених регіонах країни;

3) зниження якості налаштування та ремонту водогрійних котлів через зниження вимог їхніх власників і недостатню кваліфікацію ремонтників;

4) зниження уваги з боку держави, профільних міністерств, відомств та організацій до цієї проблематики.

Водночас проблема поліпшення енергоефективності водогрійних котлів постійно перебуває в центрі уваги дрібних і середніх комерційних фірм, які й спеціалізуються на їх ремонті та обслуговуванні. Проте [2, с. 84] радше проводять фізичну заміну агрегатів і вузлів без зміни основних принципів його функціонування. А саме впровадження автоматичної системи регулювання навантаження водогрійних котлів, на нашу думку, є сьогодні найоптимальнішим розв'язанням.

АСУ призначено для поліпшення управління технологічним процесом водогрійного котла через регулювання в автоматичному режимі системи його навантаження. Ієрархічно вона має трирівневу структуру та складається з нижнього, середнього та верхнього рівнів:

1. Нижній рівень АСУ представлено датчиками температури, тиску, рівня витрат палива, різноманітними виконавчими механізмами, місцевими постами, що виконують роль засобів дистанційного керування, а також іншими об'єктами, які дають змогу оператору контролювати весь процес як у ручному режимі, так і в автоматичному.

2. Середній рівень АСУ представлено її основним модулем, який реалізує власне логіку управління системою водонагріву та ґрунтується на програмованому контролері. Основними функціями цього модуля є збір інформації, її обробка, управління котлом для його захисту від позаштатних ситуацій. Окрім того, у роботу модуля також входить подача за потреби попереджувальних сигналів і сигналів про аварію на об'єкті, а також подача сигналів до штатної котельної автоматики. Усі елементи середнього рівня АСУ водогрійного котла встановлено в шафі управління, на лицьовій стороні якої закріплюють панель для виконання

завдання відбиття основних параметрів технологічного процесу.

3. До верхнього рівня АСУ водогрійного котла входять усі засоби, які здатні реалізувати відбиття, архівування та протоколювання інформації про технологічний процес, а також дистанційно керувати основним модулем завдяки функції прямого регулювання або зміни основних параметрів технологічного процесу.

Для побудови АСУ водогрійного котла варто провести його аналіз як об'єкта управління. Для якісного проходження технологічного процесу варто виділити низку параметрів, які безпосередньо впливають на сам технологічний процес. Об'єктом АСУ є сам котел, на якого чинять вхідний вплив три основних параметри: тиск газів, температура води й тиск повітря, які підводяться до водогрійного котла насосами (вода), вентилятором (повітря) та газорозподільчим пристроєм (газ). Безпосередньо в пальнику пальна суміш згоряє, віддаючи своє тепло в топку котла й нагріваючи так воду.

Вихідний вплив котла чинять димовий газ і нагріта вода (рис. 1).

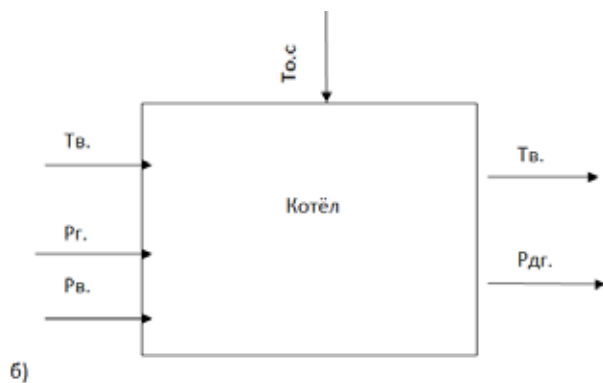


Рис. 1. Функціональна схема нагріву води в котлі – схема процесу САУ

Регулювання тиску газу у водогрійному котлі передбачено для нівелювання істотного впливу температури зовнішнього середовища ( $T_{з.с.}$ ), яка істотно впливає на температуру води на виході ( $T_{в.}$ ). Окрім першого фактора, на температуру води на виході впливають температура зворотної води в мережі ( $T_{з.в.}$ ) та норма витрати газу, який подається на пальник (рис. 2).

Тому для створення схеми АСУ навантаження водогрійного котла треба ввести показник регулятора навантаження  $P$ , пов'язаний із плунжером пневматичного розбризкувача та який працює на основі подачі здвоєних імпульсів – витрат палива та повітряного тиску (рис. 3).

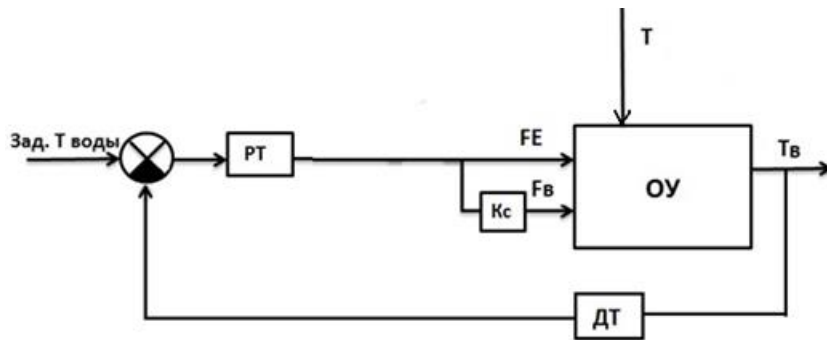


Рис. 2. Структурна схема САУ

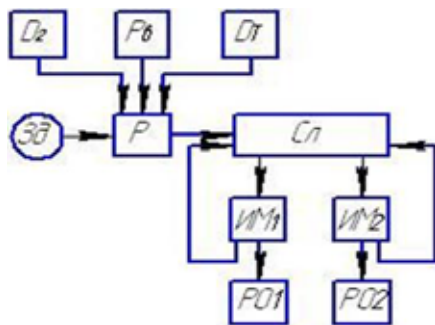


Рис. 3. Структурна схема регулювання повітря з регулятором P (паливо-повітря)

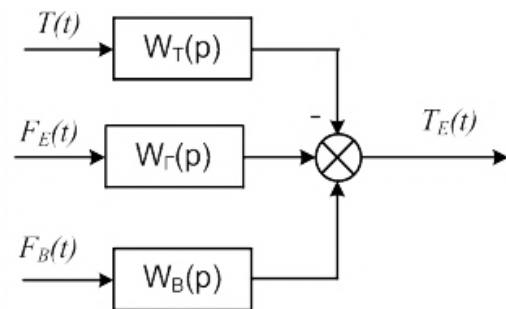


Рис. 4. Структурна схема моделі САУ водогрійного котла

Щоб математично описати елементи САУ водогрійного котла, варто знати показники:

- $T_E(t)$  – температури води на виході;
- $F_E(t)$  – витрати газу;
- $F_B(t)$  – витрати повітря;
- $T(t)$  – температури води на вході (рис. 4).

На практиці для розрахунку регулювального клапана експериментально визначаємо потрібні показники: тиск води перед регулювальним органом  $P_1=64$  кгс/см<sup>2</sup>, тиск води після регулювального органу  $P_2=63$  кгс/см<sup>2</sup>, температуру води  $t=150$  °С, витрати води  $Q=40$  кг/с=170 м<sup>3</sup>/год.

Водночас перепад тиску на регулювальному органі становить

$$\Delta P_{pk} = 1 \text{ МПа} = 10 \text{ бар}$$

Далі варто розрахувати коефіцієнт пропускної спроможності регулювального клапана за формулою

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_{pk}}} = 170 \sqrt{\frac{0.851}{10}} = 49.6 \text{ м}^3/\text{год}$$

Водночас виділимо 20 % запасу

$$K_v' = K_v * 1,2 = 60 \text{ м}^3/\text{год}$$

Максимальна пропускна спроможність регулювального клапана становить (згідно з каталогом)  $K_v \text{ max}=100$  м<sup>3</sup> та діаметр 6 см. Визначивши величини об'ємних максимальних витрат (бл. 3428 м<sup>3</sup>/год), об'ємних мінімальних витрат (за

умови 20 %  $Q_{\text{min}}=0.2 Q=34$  м<sup>3</sup>/год) та максимального й мінімального значення відносності витрат:

$$\mu_{\text{max}} = \frac{Q}{Q_{\text{max}}} = \frac{170}{342.8} = 0.5 \text{ та } \mu_{\text{min}} = \frac{Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} = \frac{34}{342.8} = 0.1,$$

можна визначити коефіцієнт передачі регулювального клапана:

$$K_{po} = \frac{\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{min}}}{\Delta S} = \frac{0.5 - 0.1}{0.38} = 1.052 \frac{\text{м}^3/\text{год}}{\% \text{хода PO}}$$

Для налаштування регулятора використаємо методіку регулювання багатомних теплових процесів, що мають запізнення (метод Л.І. Простора). Отримана крива розгону дала можливість визначити співвідношення

$$a = \frac{\ddot{A}}{T_a} = \frac{50}{180} = 0.277.$$

Знаючи ці параметри, за методикою Кона визначаємо оптимальні налаштування регулятора:

$$k = k_M \cdot k_p \Rightarrow k = k_M \cdot k_p$$

Ці обчислення дали змогу створити функціональну схему автоматизації навантаження водогрійного котла (рис. 5).

На практиці для апробації результатів дослідження було обрано аналоговий перетворювач температури «Метран К2712, врізний витратомір стисненого повітря й газів VA 400, датчик тиску із функцією перетворення «Сафір ТН-2160», тер-

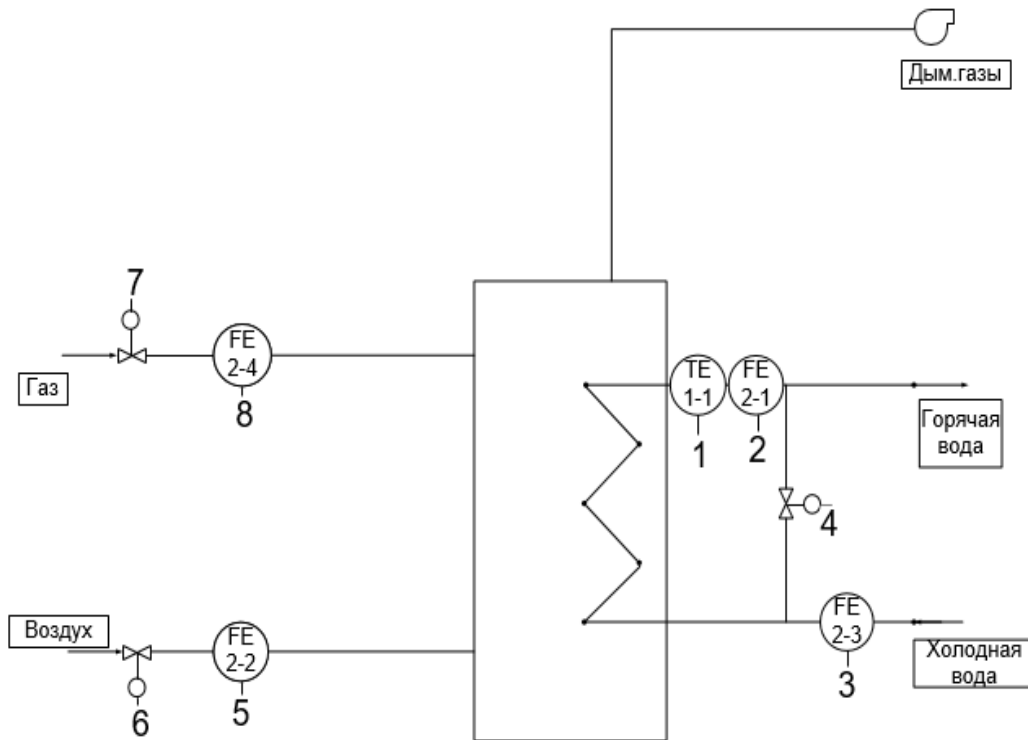


Рис. 5. Функціональна схема автоматизації навантаження водогрійного котла



Рис. 6. Мнемосхема АСУ навантаження водогрійного котла

моперетворювач опору, термометр опору, витратомір із датчиком Голла, перетворювач частоти обертання, нормуючий перетворювач, безконтактний вимикач і контролери зв'язку. Як програмне забезпечення було обрано програму SCADA (TRACE MODE), яка завдяки унікальній технології побудови дає можливість створити зв'язки між вузлами розподіленої системи управління, між джерелами даних SCADA і каналами, створити джерела даних за відомою конфігурацією контролера тощо (рис. 6).

**Висновки.** Отже, результатом дослідження стало обґрунтування та побудова схеми автоматизованої системи управління навантаження водогрійного котла.

Було побудовано функціональну схему автоматизації, мнемосхему (за допомогою програми SCADA (TRACE MODE), математичну модель АСУ.

Також було обґрунтовано, чому варто впроваджувати автоматичну систему регулювання навантаження водогрійних котлів.

#### Список літератури:

1. Кон Л.І., Юсим В.М. Апроксимація перехідних функцій складних регульованих об'єктів із запізненням, рішення лінійних диференціальних рівнянь. Методичні вказівки з курсу «Теорія автоматичного регулювання». Одеса : ОПИ, 1976. 116 с.
2. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. 4е изд., стер. Москва : Издательский дом МЭИ, 2007. 175 с.
3. Сабанин В.Р., Кормилицин В.И., Костык В.И., Волков М.А. Совершенствование режимно-наладочных работ на котлах малой и средней мощности. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2013. № 6 (86). С. 24–28.
4. Стрикаль О.І. Автоматизація котлоагрегату КВГМ-180. НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». Київ, 2019. 83 с.
5. Шарапов В.И., Ротов П.В. Регулирование нагрузки систем теплоснабжения. *Новости теплоснабжения*. 2007. 164 с.

#### Zhukovskiy V.R. ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF IMPLEMENTATION OF THE AUTOMATIC LOAD REGULATOR SYSTEM OF HEATING BOILERS

*The first heating systems appeared in ancient Rome, and now their advanced counterparts are available to everyone. Today, various specialized equipment is used to ensure uninterrupted hot water supply and space heating. Recently, hot water boilers have become especially popular. They have a long service life and excellent water supply. In addition, they are quite easy to install and maintain.*

*The main purpose of the boiler is high-quality and fast heating of water, which is used for a variety of needs. First of all, for heating of private houses, hot water supply, and also for heating of industrial and public buildings and constructions. Efficient operation and the device of the boiler are directly related.*

*The equipment of most thermal power plants is used for 10–20 years or more, its physical resource is exhausted, it is obsolete. The best solution in this situation is to improve full-scale integrated automated process control systems (ACS) instead of outdated systems, as well as the introduction of up-to-date technological equipment that allows maximum use of control systems and thus achieve a qualitatively new level of technology.*

*The problem of regulation of hot water boilers is investigated in the work, and it is substantiated why it is necessary to introduce an automatic system of regulation of loading of hot water boilers.*

*The development of an automatic load control system for hot water boilers is also being investigated and allows to support the load by regulating the thermal parameters and was built a mnemonic of the automatic control system of the boiler load using the SCADA system TRACE MODE, this program was chosen because of its advanced functionality.*

**Key words:** automatic control system, heat supply system, perturbation, boiler, load.

**Жученко О.А.**

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

**Коротинський А.П.**

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

**Хібеба М.Г.**

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

## РОЗРОБКА РОБАСТНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПУ ВИКЛЮЧЕННЯ

*Робота спрямована на дослідження можливості застосування принципу виключення під час розроблення автоматизованих робастних систем керування. Авторами праці обґрунтовано необхідність та доцільність застосування дропаута в процесі розробки систем автоматичного керування та подальшого усереднення ансамблю регуляторів як способу синтезу робастного регулятора будь-якого типу чи структури.*

*Авторами роботи доведена можливість застосування прорідження як способу представлення невизначеного об'єкта шляхом ймовірнісної зміни параметрів моделі, наведено недоліки та переваги такого підходу. Також, відповідно до структур моделі, отриманих внаслідок прорідження, в роботі проведено узагальнення ансамблю оптимальних регуляторів у робастний регулятор.*

*Отриманий узагальнений ансамбль регуляторів враховує всі особливості проміжних оптимальних регуляторів, а можливість його узагальнення від різної кількості проріджених об'єктів та встановлення відповідних ваг визначає його точність та робастність.*

*Для сформованого невизначеного об'єкта шляхом прорідження розроблено робастний ПІД-регулятор та ПІД-регулятор на основі узагальнення ансамблю. З метою дослідження ефективності запропонованого підходу розроблення регуляторів у роботі наведено порівняльне дослідження роботи робастного ПІД-регулятора та ПІД-регулятора на основі дропаут. Ефективність роботи оцінювалась за допомогою середньої квадратичної помилки відхилення від завдання.*

*З результатів роботи розроблених регуляторів зроблено висновок, що узагальнений регулятор на основі дропаут об'єкта, відповідно до заданого критерію забезпечує кращу роботу порівняно з робастним ПІД-регулятором. З п'яти тестових варіантів чотири рази перевагу отримував узагальнений регулятор, тобто у 80% випадків.*

*Сформовано напрями подальших досліджень, а саме: дослідження оптимальної кількості «проріджених» об'єктів; дослідження можливості перенасичення структури кількістю «проріджених» об'єктів.*

**Ключові слова:** дропаут, прорідження, робастні системи керування, невизначений об'єкт, усереднення ансамблю.

**Постановка проблеми.** Випадок у системі керування має точний математичний опис, є ідеалізованим. У реальних задачах неминуче присутня невизначеність зумовлена тим фактом, що реальні фізичні системи і навколишні умови, в яких вони працюють, не можуть бути змодельовані абсолютно точно, вони можуть змінюватися непередбачуваним чином і піддаватися всіляким збуренням.

Для адекватного опису багатьох реальних об'єктів в їх математичні моделі включають неви-

значені параметри, що змінюються в заданих інтервалах, а також нелінійні характеристики чи навіть цілі динамічні блоки, які точно невідомі.

Ідея застосування дропаута в процесі розробки автоматичних системах керування базується на способі представлення невизначеного об'єкта через ймовірнісну зміну його параметрів або цілих блоків та усереднення синтезованих для кожного варіанта представлення об'єкта регуляторів (усереднення ансамблю регуляторів) задля отримання в результаті робастного регулятора.



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виключення (*dropout*) – це техніка для вдосконалення нейронних мереж шляхом зменшення перенавчання. Стандартне навчання зі зворотним розповсюдженням створює крихкі ко-адаптації, які працюють для навчальних даних. Випадкове виключення руйнує ці адаптації, роблячи присутність якогось конкретного прихованого блоку ненадійним [1].

Термін «*dropout*» (вибивання, вибирання, виключення) характеризує відключення визначеного відсотка випадкових нейронів на різних епохах під час навчання нейронної мережі. Це дуже ефективний спосіб усереднення моделей у нейронних мережах. У результаті більш навчені нейрони отримують у мережі більшу вагу [2–3].

Прорідження (*dropout*) – один із найбільш поширених та ефективних прийомів регуляризації нейронних мереж. Прорідження, що застосовується до шару, полягає у видаленні випадково вибраних ознак на етапі навчання. На етапі тестування прорідження не проводиться, замість того вихідні значення рівня зменшуються на коефіцієнт, що дорівнює коефіцієнту прорідження, для того щоб компенсувати різницю активності ознак на етапі тестування та навчання [4].

З аналізу останніх досліджень та публікацій слідує, що дропаут/прорідження – один із найбільш поширених способів представлення об'єкта в різноманітних його формах з урахуванням ймовірності утворення цієї структури. Аналіз літератури показав, що дропаут застосовується лише для регуляризації нейронних мереж, хоча межі можливостей його застосування значно більші. З огляду на вищесказане доцільним може бути використання прорідження як техніки для представлення невизначених об'єктів в автоматизації та подальшого використання в процесі синтезу адаптивних чи робастних систем.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження можливості застосування прорідження як способу ймовірнісної зміни параметрів моделі в процесі моделювання невизначеного об'єкта, узагальнення ансамблю оптимальних регуляторів у робастний регулятор відповідно до структур моделі, отриманих внаслідок прорідження, дослідження ефективності роботи запропонованого підходу в процесі синтезу робастних регуляторів.

#### Виклад основного матеріалу.

**Dropout та нейронні мережі.** Виключення, або дропаут (від англ. *dropout*) – метод регуляризації штучних нейронних мереж, призначений для запобігання перенавчання мережі [5]. Головна ідея *dropout* – замість навчання однієї глибокої

нейронної мережі (Deep Neural Network, DNN) навчити ансамбль кількох DNN, а потім усереднити отримані результати [6].

Наприклад, давайте для кожного нейрона (крім останнього, вихідного шару) встановимо деяку ймовірність  $p$ , з якою він буде викинутий із мережі. Алгоритм навчання змінюється таким чином: на кожному новому тренувальному прикладі  $x$  для кожного нейрона приймається рішення щодо його виключення з мережі з ймовірністю  $p$ , і залежно від результату або використовуємо нейрон як зазвичай, або встановлюємо його вихід завжди таким, що дорівнює нулю. Далі все відбувається без змін; нуль на виході призводить до того, що нейрон фактично випадає з графа обчислень [7].

Приклад дропаута показаний на рис. 1, де зображена тришарова нейронна мережа з п'ятьма входами і трьома шарами по три нейрона. На вихідному шарі дропаут зазвичай не роблять: нам потрібен вихід певної розмірності, і всі його компоненти зазвичай потрібні. А на проміжних, прихованих шарах дропаут можна застосувати: на рис. 1 видно, як кожен новий тренувальний приклад  $x$ , навчає вже трошки іншу мережу, де частина з'єднань викинута [7].

Основне завдання на цьому етапі полягає в наданні відповіді на питання про те, як же потім застосувати навчену мережу. На перший погляд здається, що потрібно знову провести *sampling* (відбір вибірки або вибирання, англ. *sampling* – узагальнена назва методів маніпулювання початковою вибіркою при певній меті моделювання, які дають змогу виконати структурно-параметричну ідентифікацію найкращою статистичною моделлю стаціонарного випадкового процесу [8]) великої кількості «проріджених» мереж, розраховувати їх результати та усереднити. Але насправді великої обчислювальної складності тут немає, усереднення буде еквівалентне застосуванню мережі, в якій жодні нейрони не викинуті, але вихід кожного нейрона помножений на ймовірність  $q=1-p$ , з якою нейрон залишали під час навчання.

Як було зазначено, Dropout вимикає нейрони з ймовірністю  $p$  і, відповідно, залишає їх включеними з ймовірністю  $q$ . Ймовірність виключення кожного нейрона однакова [6].

За умови, що

–  $h(x) = x \cdot W + b$  – лінійна проєкція вхідного вектора  $x$  на простір вихідних значень;

–  $a(h)$  – функція активації,

застосування Dropout до цієї проєкції на етапі навчання можна уявити як змінену функцію активації:



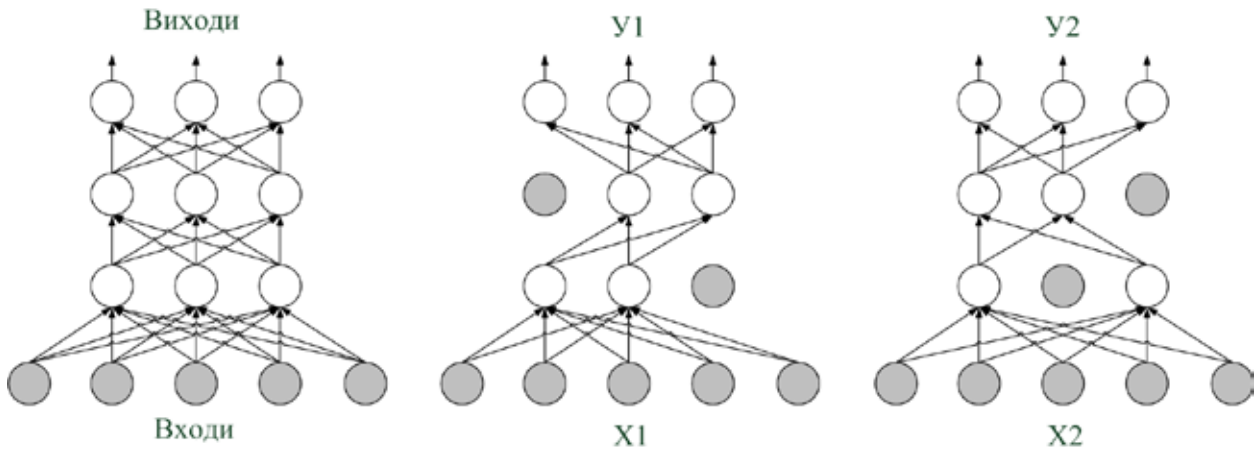


Рис. 1. Приклад роботи дропаута

$$f(h) = D \odot a(h),$$

де  $D = (X_1, \dots, X_n)$  – вектор випадкових величин  $X_i$ , розподілених за законом Бернуллі.

Очевидно, що ця випадкова величина ідеально відповідає Dropout, застосованого до одного нейрона. Застосування Dropout до  $i$ -го нейрона буде мати значення [6]:

$$O_i = X_i a\left(\sum_{k=1}^{d_i} w_k x_k + b\right) = \begin{cases} a\left(\sum_{k=1}^{d_i} w_k x_k + b\right) & \text{якщо } X_i = 1 \\ 0 & \text{якщо } X_i = 0 \end{cases}$$

Оскільки на етапі навчання нейрон залишається в мережі з ймовірністю  $q$ , на етапі тестування нам необхідно емулювати поведінку ансамблю нейронних мереж, використаного в процесі навчання. З цією метою автори пропонують на етапі тестування помножити функцію активації на коефіцієнт  $q$ . Таким чином [6]:

на етапі навчання:

$$O_i = X_i a\left(\sum_{k=1}^{d_i} w_k x_k + b\right)$$

на етапі тестування:

$$O_i = qa\left(\sum_{k=1}^{d_i} w_k x_k + b\right)$$

**Застосування Dropout у системах автоматичного керування.** Представлення невизначеного об'єкта шляхом ймовірнісної зміни його параметрів має низку переваг, основною з яких є можливість ймовірнісної характеристики об'єкта при різних варіантах його розкиду. Наприклад, номінальний опис роботи об'єкта має ймовірність 80%, а два граничних – по 10%. Таким чином, моделювання об'єкта набуває інший вигляд: по-перше, розстановка ймовірностей у такому разі має реалізовуватись спеці-

алістом у цій області, тобто ми переходимо до експертних систем; по-друге, за наявності експериментальних значень можливе проведення оптимізації цих коефіцієнтів для більш точного опису об'єкта, а це своєю чергою переводить нас до розділу оптимізації.

Оскільки синтез регулятора фіксованого об'єкта визначається рішенням однієї математичної задачі, то у разі невизначеного об'єкта з'являється набір відповідних задач, які відповідають можливим значенням  $q$ , що належить заданій допустимій множині  $Q$  (множині невизначеності). Усереднення ансамблю регуляторів призводить до певного узагальнення властивостей кожного з них, що своєю чергою і є вирішенням задач на певній допустимій множині  $Q$ , тобто до синтезу робастних регуляторів.

Не менш важливим може бути той факт, що у разі ймовірнісного представлення невизначеного об'єкта з використанням дропаута можливе вичленення певних динамічних характеристик об'єкта та визначення необхідності синтезу іншого по структурі або принципу регулятора для цього варіанту. Отже, постає питання про об'єднання регуляторів різних типів.

Є недолік у запропонованого підходу: всі синтезовані проміжні регулятори будуть оптимальними відповідно до свого представлення об'єкта, проте це не означає, що кінцевий результат забезпечить задані умови оптимальності.

**Реалізація регулятора на базі Dropout.** Розглянемо невизначений об'єкт, представлений у вигляді:

$$G(s) = \frac{s+1}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2},$$

$$0.8 \leq a_0 \leq 1.2; \quad 0.1 \leq a_1 \leq 0.4; \quad 0.8 \leq a_2 \leq 1.2;$$

Задля подальшого порівняння для цього об'єкта синтезовано робастний ПІД-регулятор із наведеними налаштуваннями:  $P=2.013$ ;  $I=1.556$ ;  $D=0.272$ ;  $N=2.57$ .

Результати роботи системи керування на базі робастного ПІД регулятора наведено на рис. 2.

Представимо наведений вище об'єкт у вигляді:

$$\frac{s+1}{a_0(p)+a_1(p)s+a_2(p)s^2},$$

де з ймовірністю  $p$  коефіцієнти  $a_0, a_1, a_2$  приймають випадкові значення із заданих діапазонів.

Отже, для кожного з штучно сформованих об'єктів можна синтезувати свій оптимальний регулятор, у цьому разі ПІД-регулятор. Узагальнення вихідного сигналу регулятора можна розглядати як:

$$u = \sum_{k=1}^n q_n PID_n(e)$$

Для описаного об'єкта сформуємо проміжні об'єкти та синтезуємо оптимальні ПІД-регулятори. Результати наведені в табл. 1.

Синтезовані регулятори були узагальнені як ансамбль регуляторів. Результати роботи синтезованого робастного регулятора на базі дропаут наведено на рис. 3.

Оцінити результати роботи розроблених регуляторів досить складно, для всіх 100 випадкових об'єктів обидва регулятори забезпечують вихід на усталений рівень. В обох випадках присутня наявність перерегулювання, що зумовлена алгоритмом налаштування регуляторів. Для робастного ПІД-регулятора характерне менше перерегулювання, проте для дропаут ПІД-регулятора швидкість виходу на усталений рівень більша, що, на думку автора, забезпечується саме налаштуванням оптимальних регуляторів для «проріджених» об'єктів.

Результати роботи синтезованого на базі дропаут регулятора були порівняні за допомогою середньої квадратичної помилки відхилення від завдання на п'яти випадкових об'єктах та наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати порівняння роботи синтезованих регуляторів

N	Робастний ПІД-регулятор	Дропаут ПІД-регулятор
1	0,0121	0,011481
2	0,011868	0,011897
3	0,0121	0,0115
4	0,012074	0,01186
5	0,011803	0,011572

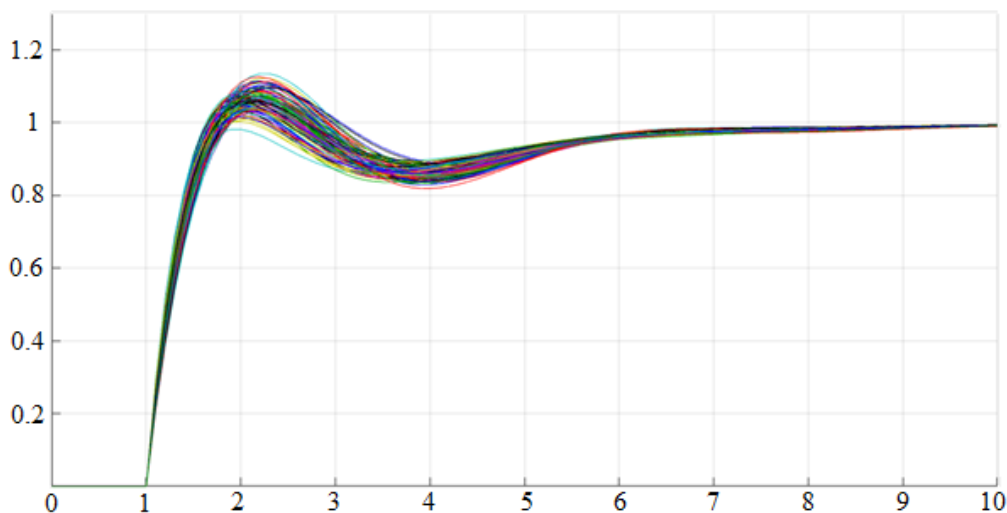


Рис. 2. Результати роботи системи керування на базі робастного ПІД-регулятора

Таблиця 1

«Проріджені об'єкти» та відповідні їм регулятори

N	q	$a_0$	$a_1$	$a_2$	P	I	D	N
1	0.2	0.8	0.1	0.8	3.195	2.44	0	100
2	0.2	1	0.2	1	1.81	1.627	0.39	7.28
3	0.2	1.2	0.4	1.2	1.09	1.158	0.21	17.63
4	0.2	0.9	0.3	1.1	0.969	0.833	0.25	16.54
5	0.2	1.1	0.1	0.9	3.936	3.463	-0.003	17.48

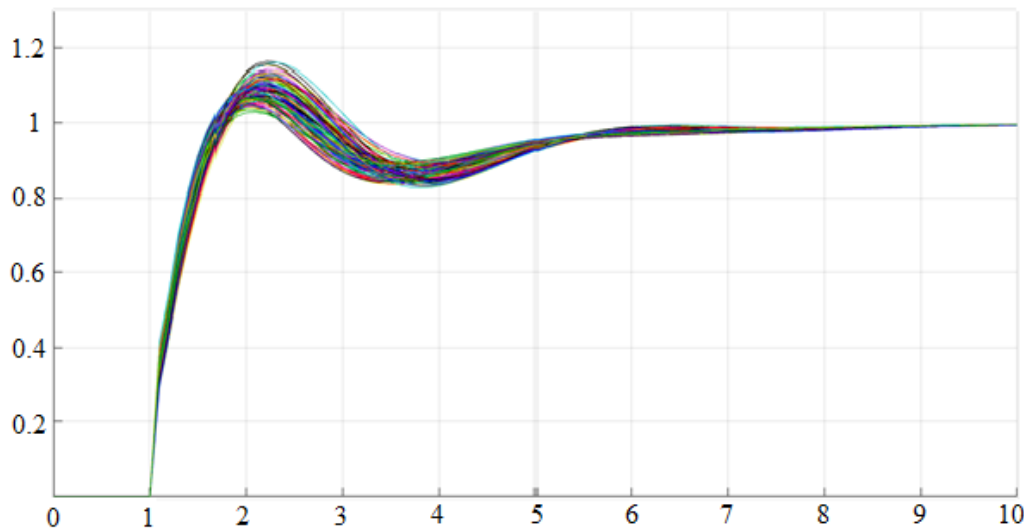


Рис. 3. Результати роботи системи керування на базі дропаут ПІД-регулятора

**Висновки.** З результатів роботи розроблених регуляторів зроблено висновок, що відповідно до заданого критерію дропаут регулятор забезпечує кращу порівняно з робастним ПІД-регулятором роботу. З п'яти тестових варіантів у чотирьох (тобто у 80%) значення критерію для дропаут регулятора менше.

На думку автора, в разі збільшення кількості «проріджених» об'єктів можливе забезпечення

більшого відсотку кращої роботи регулятора. Це своєю чергою зумовлює актуальність проведення подальшого дослідження щодо оптимальної кількості «проріджених» об'єктів.

Питання дослідження оптимальної кількості «проріджених» об'єктів також зумовлює питання про можливість перенасичення структури кількістю «проріджених» об'єктів.

#### Список літератури:

1. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. (2014) Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting. *Journal of Machine Learning Research*. 15. 1929–1958.
2. Hinton G., Srivastava N., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R., Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors, arXiv:1207.0580 (2012).
3. Warde-Farley D., Goodfellow I., Courville A., Bengio Y., An empirical analysis of dropout in piecewise linear networks, arXiv:1312.6197 [stat.ML] (2013-12-20).
4. Шолле Франсуа Глубокое обучение на Python. Санкт-Петербург : Питер, 2018. 400 с.: ил. (Серия «Библиотека программиста»)
5. Вікіпедія: вільна енциклопедія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F\\_\(%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%96\\_%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D1%96\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D1%8E%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_(%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%96_%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D1%96))
6. Paolo Galeone Analysis of Dropout / P. Galeone's blog. URL: <https://habr.com/ru/company/wunderfund/blog/330814/>
7. Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Глубокое обучение погружение в мир нейронных сетей. Санкт-Петербург : Питер, 2018. 480 с.: ил. (Серия «Библиотека программиста»)
8. Lance, P. & Hattori, A. (2016). Sampling and Evaluation. Web: MEASURE Evaluation. pp. 6–8, 62–64.

#### Zhuchenko O.A., Korotynskiy A.P., Khibeba M.H. DEVELOPMENT OF AUTOMATIC ROBUST CONTROL SYSTEMS BASED ON DROPOUT PRINCIPLE

*The work is aimed at researching the possibility of applying the dropout principle in the automated robust control systems development. The authors substantiate necessity and expediency of using dropout in the automatic control systems development and further regulators ensemble averaging, as a method for any type or structure robust regulator synthesis.*

*The authors prove the possibility of using thinning as a way to represent an indefinite object by the model parameters probabilistic change, the disadvantages and advantages of this approach are given. Also, in accordance with model structures obtained as a dropout result, the averaging of optimal regulators ensemble into a robust regulator is carried out in the work.*

*The resulting generalized regulators ensemble takes into account all the intermediate optimal regulators features, and the possibility of generalizing it from a different number of non-dropped objects and setting the appropriate weights determines its accuracy and robustness.*

*A robust PID controller and a PID controller based on the ensemble generalization have been developed for the indefinite object formed by dropout. A comparative research of robust PID controller and PID controller based on dropout was made to study the proposed regulators development approach effectiveness. The work efficiency was evaluated using the standard deviation from the task error.*

*From the developed controllers results, it was concluded that the generalized controller based on the object “dropout” provides better performance compared to the robust PID controller, according to the specified criteria. The generalized regulator prevailed four times from the five test objects, ie in 80% of cases.*

*The further research areas have been formed, namely: the “thinned” objects optimal number research; the possibility of the structure oversaturation with the number of “thinned” objects research.*

**Key words:** dropout, thinning, robust control systems, undefined object, ensemble averaging.

**Коротун О.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Вакалюк Т.А.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Кушнірчук О.М.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Марцева Л.А.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗРОБКИ ІНТЕРАКТИВНОГО ВЕБСЕРВІСУ КІНОФІЛЬМІВ ІЗ МОЖЛИВІСТЮ ПРОГНОЗУВАННЯ КАСОВОГО УСПІХУ ФІЛЬМУ

*Кінотворці використовують приватні системи прогнозування касового успіху для розуміння того, чи варто створювати саме сьогодні фільми конкретних жанрів. Саме для цього створюється вебсервіс кінофільмів із можливістю прогнозування касового успіху фільму, щоб будь-який користувач міг побачити приблизний касовий успіх. Прогнозування касового успіху – це саме те, чого потребує кожний кінематограф, кожна кіностудія та кожен, хто цікавиться фільмами. Оскільки для виробників кінофільмів немає сенсу створювати те, що не принесе кошти, для глядачів немає сенсу витратити гроші на неякісну кінокартину. Застосування нейронної мережі для прогнозування касового успіху значно покращить досвід кінематографів та глядачів, яким кортять дізнатися приблизний касовий успіх фільму. Метою роботи є проектування архітектури та розробка алгоритмів роботи вебсервісу кінофільмів із можливістю прогнозування касового успіху. Прогнозування – процес передбачення майбутнього стану предмета чи явища на основі аналізу його минулого і сучасного, систематично оцінювана інформація про якісні й кількісні характеристики розвитку вибраного предмета чи явища в перспективі. Результатом прогнозування є знання про майбутнє і про ймовірний розвиток сьогочасних тенденцій конкретного явища-об'єкта в подальшому існуванні. У цьому дослідженні було проаналізовано функціональні та нефункціональні вимоги до інтерактивного вебсервісу з можливістю прогнозування касового успіху кінофільмів. Побудовано діаграму варіантів використання та на її основі розроблено діаграму класів для аналізу основної структури системи. Спроектовано та реалізовано базу даних відповідно до вимог реляційної моделі: забезпечення збереження та колективний доступ до переліку кінофільмів та інформації про них. Розроблено нейронну мережу для прогнозування та основні модулі для роботи вебсервісу.*

**Ключові слова:** прогнозування, нейронні мережі, вебсервіс, архітектура, алгоритм.

**Постановка проблеми.** Кожну секунду у світі проходять зйомки кінофільмів, що є доволі вигідною справою. Кінотворці використовують приватні системи прогнозування касового успіху для розуміння того, чи варто створювати нині фільми конкретних жанрів. Світ змінюється і попит також, як відомо, попит породжує пропозицію, а щоб запропонувати, необхідно знайти цей попит, відзнявши кінофільми різних жанрів, і на основі аналізу отриманих даних з'ясувати, які типи фільмів приносять найбільший прибуток. Саме для цього створюється вебсервіс кінофільмів із можливістю прогнозувати касовий успіх фільму, щоб будь-який користувач

міг побачити приблизний касовий успіх. Прогнозування касового успіху – це саме те, чого потребує кожен кінематограф, кожна кіностудія та кожен інший, хто цікавиться фільмами. Оскільки для виробників кінофільмів немає сенсу створювати те, що не принесе кошти, для глядачів немає сенсу витратити гроші на неякісну кінокартину.

Застосування нейронної мережі для прогнозування касового успіху значно покращить досвід кінематографів та глядачів, яким кортять дізнатися приблизний касовий успіх фільму.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнім часом дедалі більше науковців приді-

ляють увагу прогнозуванню в різних сферах: як у техніці, так і в економіці. Цьому питанню приділили свої праці такі науковці, як В. Волохата [6], О. Дзендзелок [7], О. Любич [4], В. Мартинюк [8], С. Реуцький [3], Н. Рилової [5] та ін. Окрім того, методикою застосування різних видів прогнозування займалися Ю. Бажал, Н. Громов, Л. Федулова та ін.

**Постановка завдання.** Метою роботи є проектування архітектури та розробка алгоритмів роботи вебсервісу кінофільмів із можливістю прогнозування касового успіху.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Прогнозування – процес передбачення майбутнього стану предмета чи явища на основі аналізу його минулого і сучасного, систематично оцінювана інформація про якісні й кількісні характеристики розвитку вибраного предмета чи явища в перспективі. Результатом прогнозування є знання про майбутнє і ймовірний розвиток сьогочасних тенденцій конкретного явища-об'єкта в подальшому існуванні.

З огляду на тематику кінофільмів прогнозування може бути як автоматизоване, так і ручне, в будь-якому з цих випадків потрібні попередні дані фільмів які вже відзначили прем'єру, яка доля їх настигла, скільки грошей було отримано, хто та як зіграв свою роль, який сценарій до фільму та хто його писав та невід'ємна частина – режисура.

Алгоритми машинного навчання можна описати як навчання цільової функції  $f$ , яка найкращим чином співвідносить вхідні змінні  $X$  і вихідну змінну  $Y$ ,  $Y = f(X)$ .

Що собою являє функція  $f$ , невідомо. Якби знали, то використовували б її безпосередньо, а не намагалися навчити за допомогою різних алгоритмів.

Найбільш поширеним завданням у машинному навчанні є передбачення значень  $Y$  для нових значень  $X$ . Це називається прогностичним моделюванням, і наша мета – зробити передбачення якомога точнішим.

Нейронні мережі допомагають людству класифікувати та класифікувати інформацію. Класифікація включає передбачення, до якого класу належить об'єкт. Деякі класифікатори є двійковими, внаслідок чого приймається рішення «так / ні». Інші – багатокласні, здатні класифікувати об'єкт на одну з декількох категорій. Класифікація є дуже поширеним випадком машинного навчання – алгоритми класифікації використовуються для вирішення таких проблем, як фільтрування спаму по електронній пошті, категоризація

документів, розпізнавання мови, розпізнавання зображень, розпізнавання рукописного тексту та прогнозування. Розглянемо різновиди нейронних мереж.

**Нейронні мережі прямого поширення** (feed forward neural networks, FF або FFNN) і **перцептрони** (perceptrons, P) – дуже прямолінійні, вони передають інформацію від входу до виходу. Нейронні мережі нерідко описуються у вигляді листового торта, де кожен шар складається із вхідних, прихованих або вихідних нейронів. Нейрони одного шару не пов'язані між собою, а сусідні шари зазвичай повністю пов'язані. Найпростіша нейронна мережа має дві вхідних нейрони і один вихідний і може використовуватися в якості моделі логічних зв'язків. FFNN зазвичай навчається за методом зворотного поширення помилки, в якому мережа отримує безліч вхідних і вихідних даних [2]. Цей процес називається навчанням з учителем, і він відрізняється від навчання без учителя тим, що в другому випадку вихідні дані немає з чим звірити і нейронна мережа оцінює правильність даних самостійно і це зазвичай призводить до значної кількості помилок. Вищезазначена помилка є різницею між правильними даними і прогнозованими даними. Якщо в мережі є достатня кількість прихованих нейронів, вона теоретично здатна змоделювати взаємодію між вхідними і вихідними даними. На практиці такі нейронні мережі використовуються рідко, але їх часто комбінують з іншими різновидами мереж для отримання нових.



Рис. 1. Структура нейронних мереж прямого поширення

**Згорткові нейронні мережі** (convolutional neural networks, CNN) і **глибинні згорткові нейронні мережі** (deep convolutional neural networks, DCNN) – сильно відрізняються від інших видів мереж. Зазвичай вони використовуються для обробки зображень, рідше для аудіо. Типовим способом застосування CNN є класифікація зображень: якщо на зображенні присутній кіт, мережа видасть «кіт», якщо собака – «собака». Такі мережі зазвичай використовують «сканер», що не парсить усі дані за раз. Наприклад, якщо у вас є зображення  $200 \times 200$ , ви не будете одразу обробляти всі 40 тисяч пікселів. Замість цього, мережа зчитає квадрат розміру  $20 \times 20$  (зазвичай із лівого верхнього кута), потім



зрушиться на 1 піксель і зчитує новий піксель тощо. Потім ці вхідні дані передаються через згорткові шари, в яких не всі вузли з'єднані між собою. Ці шари мають властивість стискатися з глибиною, причому часто використовуються ступені двійки: 32, 16, 8, 4, 2, 1. На практиці до кінця CNN прикріплюють FFNN для подальшої обробки даних. Такі мережі називаються глибокими (DCNN) [2].

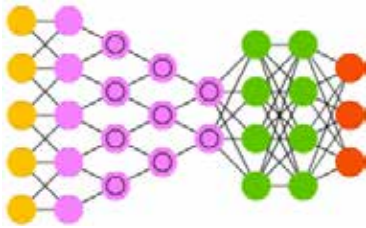


Рис. 2. Структура згорткових нейронних мереж

**Розгорткові нейронні мережі** (deconvolutional networks, DN), так звані зворотні графічні мережі, є зворотними до згорткових нейронних мереж. Уявіть, що ви передаєте мережі слово «кіт», а вона генерує картинку з котами, схожими на реальні зображення котів. DNN теж можна об'єднувати з FFNN. Варто зауважити, що здебільшого мережі передається не рядок, а якийсь бінарний вектор: наприклад,  $\langle 0, 1 \rangle$  – це кіт,  $\langle 1, 0 \rangle$  – собака, а  $\langle 1, 1 \rangle$  – і кіт, і собака [2].

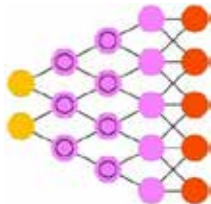


Рис. 3. Структура розгорткової нейронної мережі

Унікальна сила нейронних мереж полягає в здатності динамічно створювати складні функції прогнозування та імітувати людське мислення таким чином, що не може зробити жоден інший алгоритм. Є багато проблем класифікації, нейронні мережі вирішують такі проблеми найкращим чином.

Проаналізувавши кілька різновидів нейронних мереж можна вирішити, яку мережу необхідно використати для прогнозування касового успіху. Згорткові та розгорткові нейронні мережі не підходять для прогнозування. Оскільки нейронні мережі прямого поширення передбачають можливість прогнозування даних, було вибрано саме цей різновид мереж. До цієї нейронної мережі можна застосувати навчання з вчителем, також

вона здатна вмещувати велику кількість вхідних та прихованих шарів, що надалі дасть змогу прогнозувати максимально точно. Чим більше параметрів можна надати для аналізу, тим точнішим є результат.

Аналіз наукових джерел показав, що відсутні думки відомих математиків чи економістів, тому можемо оперувати лише поглядами глядачів, які поділилися своїми думками. Тому зрозуміло, що можливою причиною є складний процес виявлення успіху кінокартин, незначна швидкість відбору необхідної інформації, складний аналіз того, що саме людей цікавить у різні періоди їхнього життя.

Розглянемо одне з рішень глядачів. Глядач використав базу даних з інформацією від співтовариства про 5000 кінофільмів. БД присутня у відкритому доступі на вебресурсі kaggle.com. Знаючи лише кілька фактів про фільм до його виходу, прогнозуюча модель може показати доволі якісний та точний прогноз, наприклад, для того щоб кінотеатри заздалегідь вирішили, чи варто показувати фільм протягом тривалого періоду.

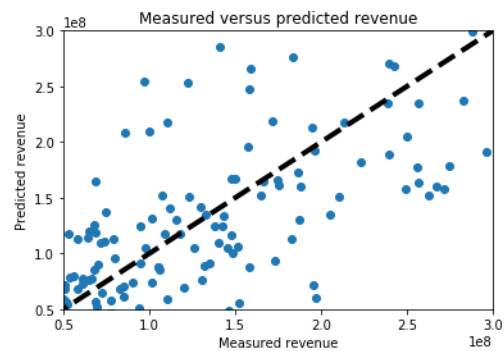


Рис. 4. Прогнозування касових зборів

Глядач-програміст повідомляє: «Для моделі прогнозування рейтингу фільму я прогнав дані, використавши «пошукову сітку» Гіперпараметр та регресорну бібліотеку XGBoost. Я спробував кілька інших бібліотек для роботи з «пошуковими сітками», включаючи випадкові регресори лісу та неймовірно продуктивну нейромережу. «Пошукова сітка» значно покращила результати XGBoost – бібліотеки, яка рекомендується за свою швидкість та точність». Модель прогнозує касові збори кінофільмів із точністю в 77%.

Під час пошуку аналогів застосування нейронних мереж для прогнозування касових зборів кінофільмів було знайдено лише один аналог, від глядача в мережі Інтернет.

Шаблон проектування Model View Controller (MVC) визначає, що додаток складається з моделі

даних, представлення інформації та керування даними. Згідно з шаблоном проектування необхідно, щоб кожна частина шаблону була поділена на різні об'єкти. MVC здебільшого стосується інтерфейсу користувача / рівня взаємодії програми. Також може знадобитися рівень бізнес-логіки, можливо, рівень обслуговування та рівень доступу до даних [1].

**Model** містить лише дані додатку, вона не містить жодної логіки, яка описує, як представити дані користувачеві [1]. **View** відображає користувачеві дані моделі. Представлення даних знає, як отримати доступ до даних моделі, але не знає, що ці дані означають або що користувач може зробити, щоб ними маніпулювати [1]. **Controller** існує між видом та моделлю. Він прослуховує події, викликані представленням (або іншим зовнішнім джерелом), і виконує відповідну реакцію на ці події. Здебільшого реакція полягає у виклику методу на моделі. Оскільки представлення та модель пов'язані за допомогою механізму сповіщення, результат цієї дії автоматично відображається у представленні [1].

Для створення інтерактивного вебсервісу було вибрано таку архітектуру: вебсервер Apache, система керування базою даних MySQL, мову програмування PHP, набір інструментів (фреймворк) Yii2.

Визначимо функціональні вимоги вебсервісу:

- 1) авторизація користувачів у системі, а також їх реєстрація;
- 2) можливість збереження інформації в системі;
- 3) можливість працювати з інформацією (додавати, редагувати, видаляти);
- 4) можливість адміністратора вебсервісу створювати добірки кінофільмів для користувачів;
- 5) підтримка англійської, української та російської мов вебсервісом;

6) пошук необхідної користувачеві інформації на вебсайті;

7) запуск прогнозування касового успіху кінофільмів.

На рис. 5 зображено діаграму варіантів використання, як саме можна взаємодіяти із сервісом у ролі гостя та в ролі авторизованого користувача. Аналіз функціональних вимог дав нам змогу виділити 4 ролі в проєкті (гість, авторизований користувач, модератор та адміністратор), що забезпечать функціонування вебсервісу. Відповідно, можливості в кожній ролі будуть свої (див. рис. 5 та 6).

Виділимо нефункціональні вимоги вебсервісу:

1) сприйняття: час, потрібний для освоєння вебсайту, – від 1 до 2 хвилин, для досвідчених менше 1 хвилини; час відповіді вебсайту на дії користувача не мають перевищувати 1 секунди, а для складних не більше – 2 секунд; інтерфейс вебсайту має бути інтуїтивно зрозумілим та зручним для користувача та не вимагати від нього додаткової підготовки;

2) надійність: вебсервіс має бути доступний протягом усієї доби;

3) продуктивність: велика кількість користувачів має змогу переглядати вебресурс одночасно.

Зобразимо діаграму класів вебсервісу кінофільмів із можливістю прогнозування касового успіху (рис. 7).

Також реалізуємо базу даних movies, використовуючи СКБД MySQL. БД складається із 18 таблиць, що вміщують усі необхідні дані для коректної роботи вебсервісу. Схема цієї бази даних зображена на рис. 8.

Опишемо діаграму активності використання вебсервісу користувачами (рис. 9):

– під час переходу на сайт користувач може пройти реєстрацію, авторизуватися в обліковий запис, або переглянути перелік кінофільмів, які є на вебсервісі;

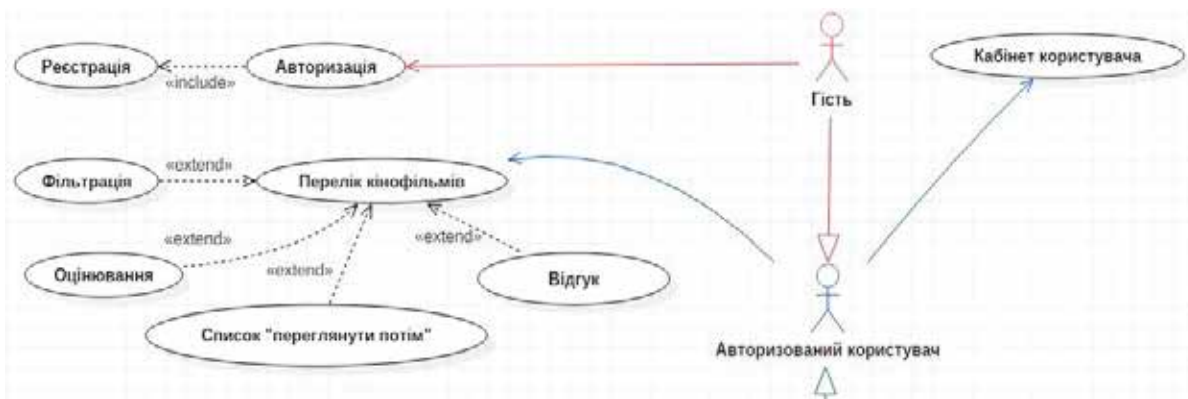


Рис. 5. Діаграма використання вебсервісу гостем та авторизованим користувачем



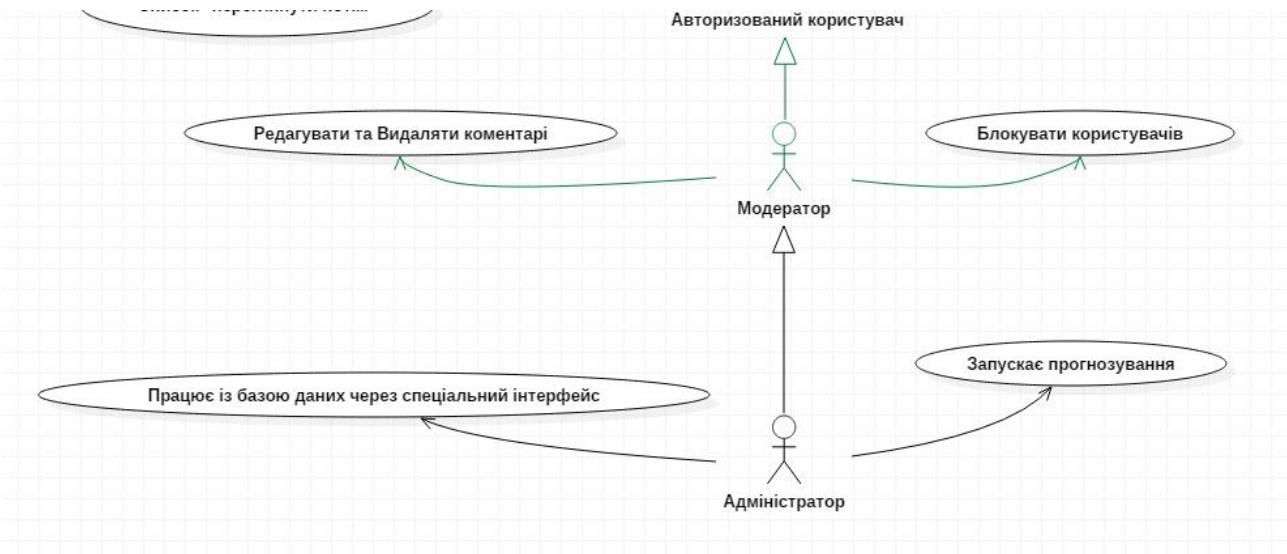


Рис. 6. Діаграма варіантів використання користувачами вебсервісу фільмів

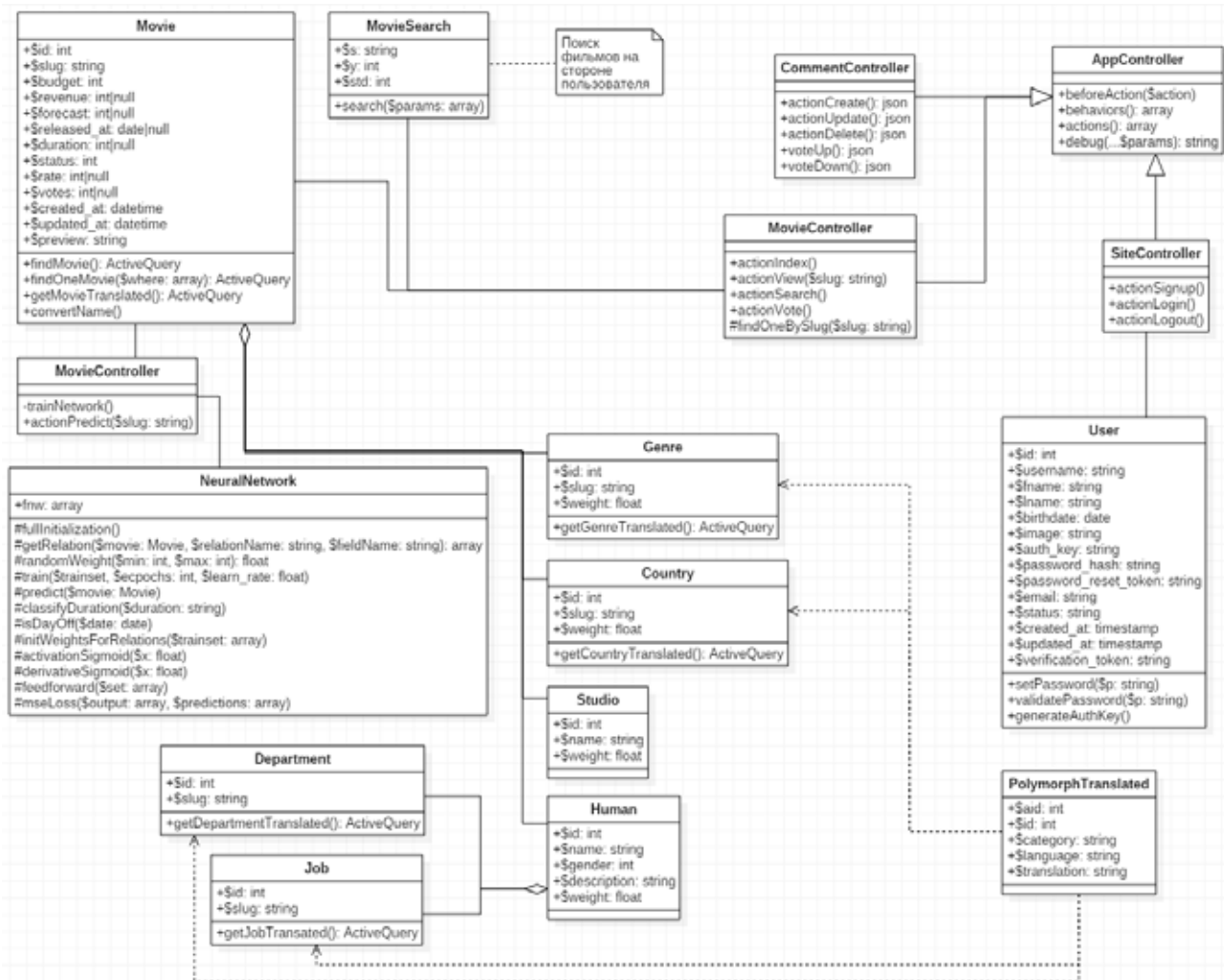


Рис. 7. Діаграма класів вебсервісу кінофільмів

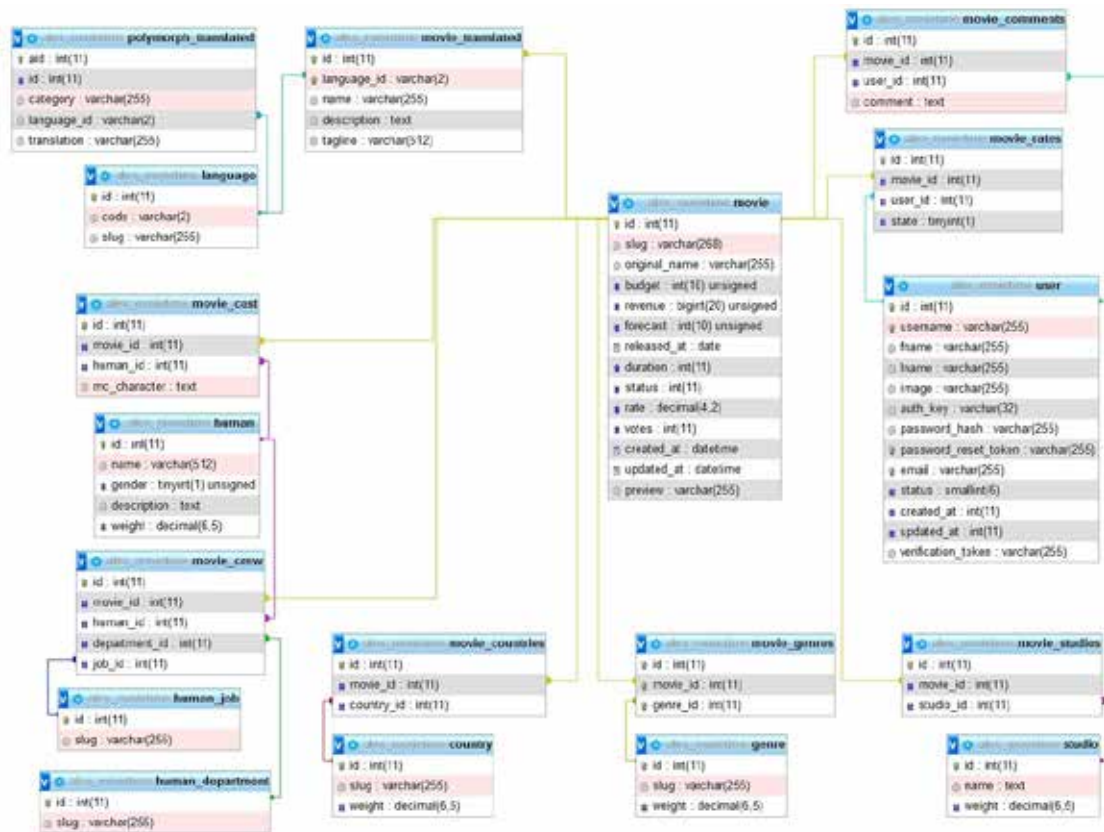


Рис. 8. Схема бази даних

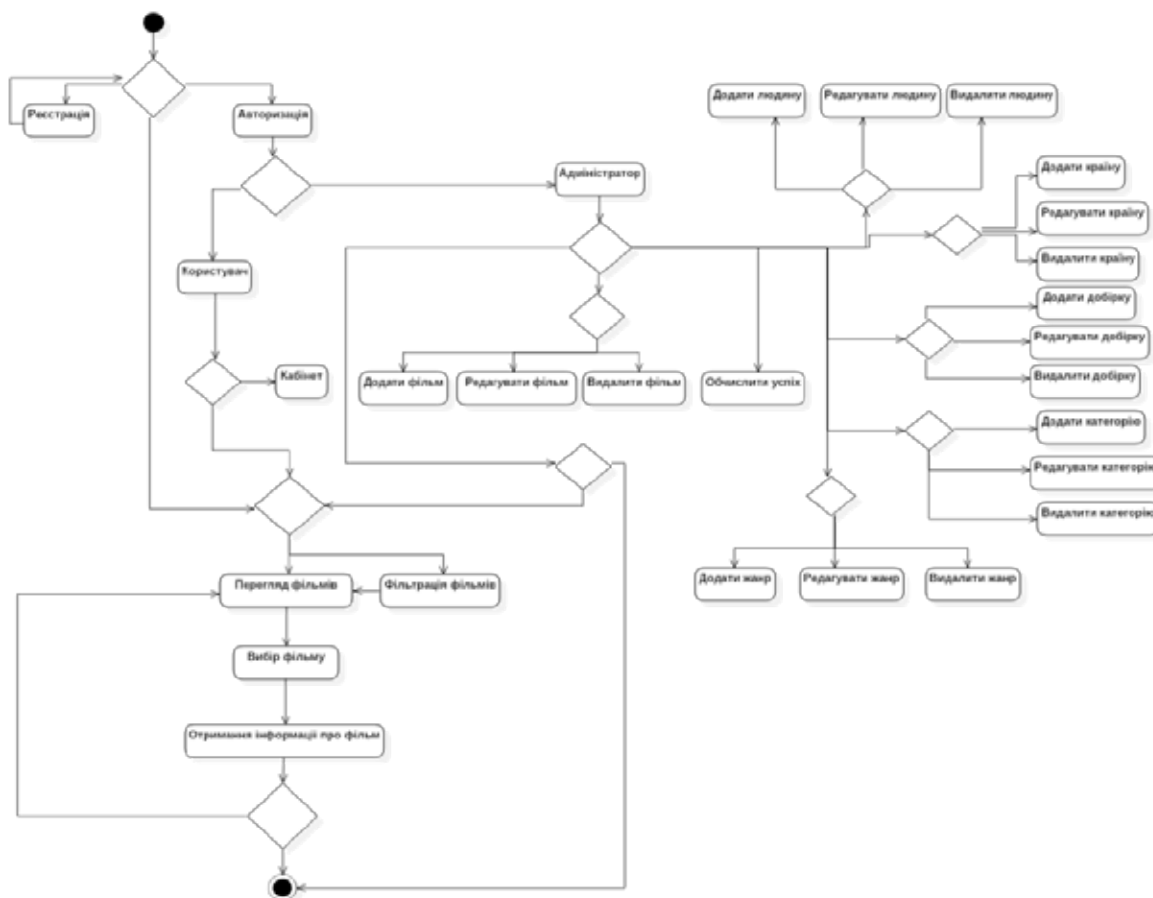


Рис. 9. Діаграма активності використання вебсервісу користувачами

- якщо користувач авторизується, він отримає доступ до свого кабінету, змогу залишати відгуки та ставити рейтинг фільму;

- адміністратор може створювати добірки з фільмами, які є в базі даних, редагувати їх або ж знищувати;

- адміністратор може запустити систему прогнозування касового успіху фільмів.

Зобразимо діаграму послідовності додавання нового фільму та подальшого обрахування успіху цього ж фільму (див. рис. 10).

Опишемо діаграму послідовності додавання нового фільму та обрахування для нього успіху:

- гість проходить авторизацію і входить в обліковий запис із правами адміністратора;

- переходить до панелі адміністратора, проходить ще одну аутентифікацію;

- переходить на сторінку додавання нових фільмів, створює такий, заповнюючи усі необхідні йому поля;

- переходить у місце обчислення касового успіху кінофільмів та натискає кнопку прогнозу фільму.

Для реалізації інтерактивного вебсервісу кінофільмів із можливістю прогнозування касового успіху фільмів було створено та реалізовано значну кількість класів. Основним класом є NeuralNetwork, який описує нейронну мережу.

Було створено нейронну мережу з 3 шарами у вигляді класичного перцептрона. Прихований шар містить 2 нейрони. Вихідний шар містить 1 нейрон (див. рис. 11).

Нейронна мережа складається із 4 вхідних параметрів: бюджет кінофільму, тривалість

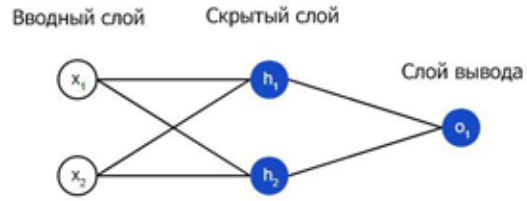


Рис. 11. Перцептрон

фільму, день прем'єри (відбувся у вихідний день чи ні), та 18 жанрів. Кожному жанру на вхід подається значення 0 або 1 залежно від того, чи підпадає фільм під конкретний жанр.

Для обчислення похибки прогнозування було використано метод середньоквадратичної помилки. Нейронна мережа навчалась за алгоритмом оптимізації «стохастичний градієнтний спуск».

Навчена нейронна мережа показала похибку прогнозування у 0.193 за тисячу епох, меншого значення помилки досягти не вдалось через недостатність вхідних даних (див. рис. 12).

Epoch 0 loss: 0.225	Epoch 900 loss: 0.193
Epoch 10 loss: 0.194	Epoch 910 loss: 0.193
Epoch 20 loss: 0.193	Epoch 920 loss: 0.193
Epoch 30 loss: 0.193	Epoch 930 loss: 0.193
Epoch 40 loss: 0.193	Epoch 940 loss: 0.193
Epoch 50 loss: 0.193	Epoch 950 loss: 0.193
Epoch 60 loss: 0.193	Epoch 960 loss: 0.193
Epoch 70 loss: 0.193	Epoch 970 loss: 0.193
Epoch 80 loss: 0.193	Epoch 980 loss: 0.193
Epoch 90 loss: 0.193	Epoch 990 loss: 0.193
Epoch 100 loss: 0.193	Epoch 1000 loss: 0.193

Рис. 12. Помилка прогнозування досягла 0.193

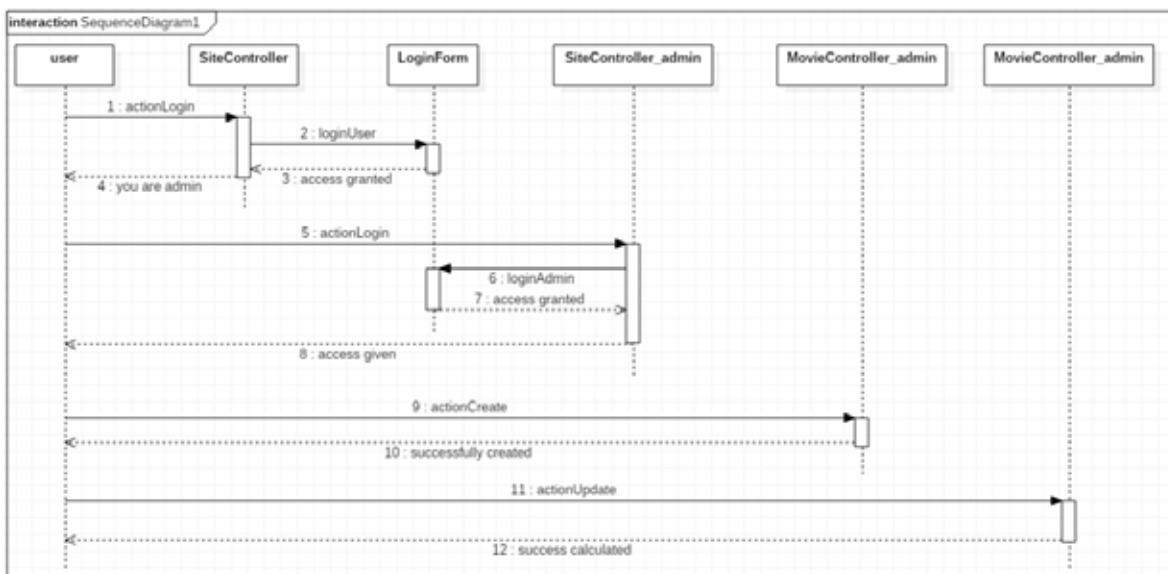


Рис. 10. Діаграма послідовності додавання нового фільму та обрахування для нього успіху

**Висновки.** У цьому дослідженні було проаналізовано функціональні та нефункціональні вимоги до інтерактивного вебсервісу з можливістю прогнозування касового успіху кінофільмів. Побудовано діаграму варіантів використання та на її основі розроблено діаграму класів для аналізу основної

структури системи. Спроектовано та реалізовано базу даних відповідно до вимог реляційної моделі: забезпечення збереження та колективний доступ до переліку кінофільмів та інформації про них. Розроблено нейронну мережу для прогнозування та основні модулі для роботи вебсервісу.

#### Список літератури:

1. MVC Design Pattern. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/mvc-design-pattern/>. (дата звернення: 19.03.2021)
2. Нейронні мережі – шлях до глибинного навчання. URL: <https://codeguida.com/post/739>. (дата звернення: 19.03.2021)
3. Реуцький Є. Метод прогнозування характеристик точності вимірювальних каналів енергетичних систем. *Енергетика і автоматика*. 2016. № 3. С. 171–181.
4. Любіч О., Домрачев В. Застосування моделі ARIMA для прогнозування доходів зведеного бюджету України. *Економічно-математичне моделювання соціально-економічних систем: збірник наук. пр.* Вип. 16. Київ: МННЦІТС НАН та МОН України, 2011. С. 33–37.
5. Рилова Н., Оксаніч І. Синтез ARIMA-моделей для прогнозування коефіцієнтів виходу кондиційних напівпровідникових матеріалів. *Системи обробки інформації*. 2015. Вип. 5 (130). С. 102–107.
6. Волохата В. Управління залученими ресурсами банку на основі цінового прогнозування з використанням мультиплікативних моделей ARIMA. *Інвестиції: практика та досвід*. 2014. № 24. С. 72–78.
7. Дзендзелюк О., Костів Л., Рабик В. Побудова ARIMA-моделей часових рядів для прогнозування метеоданих на мові програмування R. *Електроніка та інформаційні технології*. 2013. Вип. 3. С. 211–219.
8. Мартинюк В. Прогнозування надходження податкових платежів до державного бюджету за допомогою використання ARIMA-моделі. *Наукові праці НДФІ*. 2011. № 2 (55). С. 46–55.

#### **Korotun O.V., Vakaliuk T.A., Kushnirchuk O.M., Martseva L.A. THEORETICAL ASPECTS OF DEVELOPING AN INTERACTIVE WEB SERVICE OF MOVIES WITH THE ABILITY TO PREDICT THE BOX OFFICE SUCCESS OF THE FILM**

*Filmmakers use private box office success prediction systems to understand whether to create films of specific genres today. This is why a web service of movies is created with the ability to predict the box office success of the film so that any user can see the approximate box office success. Predicting box office success is exactly what every cinema, every film studio, and everyone else who is interested in movies needs. Since there is no point for filmmakers to create something that will not bring money, it makes no sense for viewers to spend money on a low-quality film. The use of a neural network to predict box office success will greatly improve the experience of cinemas and viewers who want to know the approximate box office success of a film. The purpose of the work is to design the architecture and develop algorithms for the web service of movies with the ability to predict box office success. Forecasting – the process of predicting the future state of an object or phenomenon based on the analysis of its past and present, systematically evaluated information about the qualitative and quantitative characteristics of the development of the selected object or phenomenon in the future. The result of forecasting is knowledge about the future and the probable development of current trends of a particular phenomenon-object in the future. This study analyzed the functional and non-functional requirements for an interactive web service with the ability to predict the box office success of movies. The diagram of variants of use is constructed and on its basis, the diagram of classes for the analysis of the basic structure of the system is developed. The database was designed and implemented by the requirements of the relational model: ensuring the preservation and collective access to the list of films and information about them. A neural network for forecasting and basic modules for web service operation has been developed.*

**Key words:** forecasting, neural networks, web service, architecture, algorithm.

**Купін А.І.**

Криворізький національний університет

**Градовий О.В.**

Криворізький національний університет

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ УВАЖНОСТІ ОПЕРАТОРА НА ОСНОВІ ЕНЦЕФАЛОГРАФА

*Розробка методів класифікації станів електричної активності головного мозку людини, пов'язаних зі станом свідомості, є актуальним міждисциплінарним завданням. Одним із найбільш ефективних підходів до вирішення цього завдання є використання алгоритмів на основі штучних нейронних мереж. Мета – розробити метод розпізнавання і класифікації електроенцефалографічних патернів, відповідних різним станам свідомості, таким як втома та неухважність, на основі штучних нейронних мереж. Методи: розглянуті класифікатори на основі лінійних нейронних мереж, багатопшарових перцептронів. Виконано огляд принципу роботи та перспективні області застосування енцефалографа. Зроблений ретроспективний аналіз літературних джерел із питань математичних методів та апаратно-програмних засобів аналізу енцефалограми. Описано метод розпізнавання енцефалограми за допомогою нейромережі в системі контролю уваги. На основі перетворення Фур'є виконано дослідження спектральних характеристик енцефалограми. Запропоновано нейромережеву архітектуру з метою реалізації процесу розпізнавання ознак втоми оператора в реальному часі. Розглянуто один із методів оптимізації топології нейромережі. Підібрано алгоритм навчання штучної нейроструктури. Виконано програмну реалізацію всіх етапів процесу розпізнавання. Виконано запис енцефалограми, зібрано та структуровано дані вимірювання для навчання нейромережі та валідації. На основі зібраних даних виконано навчання нейромережі та валідацію отриманих результатів розпізнавання. Виконано тестування програмного забезпечення для розпізнавання в реальному часі. Побудовано графіки, що відображають результати розпізнавання. Здійснено комп'ютерне моделювання процесу розпізнавання критичних ситуацій. Зроблені розрахунки показників точності розпізнавання. Доведено адекватність та ефективність запропонованих підходів.*

**Ключові слова:** нейромережа, енцефалограф, контроль уваги, спектральний аналіз, перетворення Фур'є.

**Постановка проблеми.** У наш час є актуальною проблема контролю психоемоційного стану працівників на відповідальних посадах, від чого залежать якість виконаної роботи та безпека.

За мету було поставлено вимірювання втоми, втрати уваги та запобігання сну працівників, таких як диспетчери, пілоти, водії. Тому може бути використаний портативний енцефалограф для вимірювання електричної активності мозку. Основною проблемою є фільтрація й інтерпретація сигналу. Такі завдання розглядалися в роботах авторів [8], але залишилися невирішеними завдання автоматичного розпізнавання спектра.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні енцефалографи – багатоканальні (14 і більше) самописці, які дають змогу одночасно реєструвати електричну активність від відповідного числа електродів, встановлених на голові обстежуваного. Самі ж електроди являють собою невеликі металеві пластини або стрижні.

Відмінності в потенціалах на шкірній поверхні голови мають маленьку амплітуду, в нормі – близько 100–150 мкВ. Після зняття вони подаються на входи підсилювально-реєструючих пристроїв. Сучасні підсилювачі вельми чутливі і дають змогу виявляти електричні коливання з амплітудою лише в кілька мікрвольт. Крім реєструючих електродів, на тілі обстежуваного встановлюють електрод референсу, він служить для вирівнювання потенціалів тіла пацієнта і підсилювача.

Під час проведення електроенцефалограми (ЕЕГ) вимірюють сумарні постсинаптичні струми. Потенціал дії (ПД, короткочасна зміна потенціалу) в пресинаптичній мембрані аксона (довгого циліндричного відростка нервової клітини) викликає вивільнення нейромедіатора в синаптичну щілину. Нейромедіатор – хімічна речовина, яка здійснює передачу нервових імпульсів через синапси між нейронами. Пройшовши через синаптичну щілину, нейромедіа-

тор зв'язується з рецепторами постсинаптичної мембрани. Це викликає іонні струми в постсинаптичній мембрані. У результаті у позаклітинному просторі виникають компенсаторні струми. Саме ці позаклітинні струми формують потенціали ЕЕГ. ЕЕГ нечутлива до ПД аксонів. Хоча за формування сигналу ЕЕГ відповідальні постсинаптичні потенціали, поверхнева ЕЕГ не здатна зафіксувати активність одного дендрита або нейрона. Правильніше сказати, поверхнева ЕЕГ являє собою суму синхронної активності сотень нейронів, що мають однакову орієнтацію в просторі, розташовані радіально до шкіри голови. Токи, спрямовані по дотичній до шкіри голови, не реєструються. Таким чином, під час ЕЕГ реєструється активність радіально розташованих у корі апікальних дендритів. Оскільки вольтаж поля зменшується пропорційно відстані до його джерела в четвертому ступені, активність нейронів у глибоких шарах мозку зафіксувати набагато важче, ніж струми безпосередньо біля шкіри. Токи, реєстровані на ЕЕГ, характеризуються різними частотами, просторовим розподілом і взаємозв'язком із різними станами мозку (наприклад, сон або бадьорість). Такі коливання потенціалу показують синхронізовану активність цілої мережі нейронів.

На енцефалограмі можна відстежити такі ритми [9]:

- гамма-ритм ( $\gamma$ -ритм) – частота коливання вище 30 Гц, іноді досягає 100 Гц, амплітуда зазвичай не перевищує 15 мкВ. Реєструється в прецентральної, фронтальної, скроневої і тім'яної зонах кори головного мозку. Зазвичай дуже добре спостерігається під час вирішення завдань, які вимагають максимального зосередження уваги;

- бета-ритм ( $\beta$ -ритм) – частота коливання варіюється від 14 до 40 Гц. Амплітуда коливання зазвичай до 20 мкВ. У нормі він вельми слабо виражений і здебільшого має амплітуду 3–7 мкВ. Реєструється в області передніх і центральних звивин. Поширюється на задні центральні і лобові звивини. Бета-хвилі в нормі пов'язані з вищими когнітивними процесами і фокусуванням уваги у звичайному бадьорому стані;

- альфа-ритм ( $\alpha$ -ритм) – частота коливання варіюється від 8 до 13 Гц. Амплітуда 5–100 мкВ, найбільша амплітуда проявляється при закритих очах і в затемненому приміщенні. Реєструється переважно в потиличній і тім'яній областях (зорових відділах мозку). Реєструється у 85–95% здорових дорослих людей. Альфа-ритм пов'язаний із розслабленим станом бадьорості, спокою. Альфа-

хвилі виникають тоді, коли людина закриває очі і починає розслаблятися;

- каппа-ритм ( $\kappa$ -ритм) – частота коливання цього ритму лежить у межах від 8 до 13 Гц. Амплітуда розташовується в проміжку 5–40 мкВ. Реєстрація ритму відбувається в скроневої ділянці головного мозку. Спостерігається при пригніченні альфа-ритму в процесі розумової діяльності;

- му-ритм ( $\mu$ -ритм) – частота коливання ритму від 8 до 13 Гц. Амплітуда зазвичай не перевищує 50 мкВ. Реєструється в роландичній області, тобто відповідно до розподілу бета-ритму (локалізована в області Роландової борозди). Має параметри, подібні до альфа-ритму, але відрізняється формою хвиль, що мають округлені вершини і тому схожі на арки. Спостерігається у 10–15% індивідуумів. Пов'язаний із тактильними подразненнями і уявою руху. Активується під час розумового навантаження і психічної напруги;

- тау-ритм, лямбда-ритм, сигма-ритм. Частота коливання тау-ритму ( $\tau$ -ритму) лежить у межах від 8 до 13 Гц, частоти коливання лямбда-ритму ( $\lambda$ -ритму) і сонних веретен збігаються і знаходяться в межах від 12 до 14 Гц. Реєстрація тау- і лямбда-ритмів відбувається в області скроневої кори головного мозку. Сонні веретена реєструються по всій корі головного мозку, однак найбільш виражені в центральних відведеннях. Тау-ритм відповідає блокадою на звукові стимули. Сигма-ритм спостерігається в ЕЕГ, але повністю блокується в розвиненій фазі швидкого сну;

- тета-ритм ( $\theta$ -ритм) – частота коливання цього ритму становить від 4 до 8 Гц. Амплітуда знаходиться в межах від 20 до 100 мкВ. Реєструється у фронтальних зонах і гіпокампі. Тета-хвилі з'являються тоді, коли спокійне, розслаблене неспання переходить у сонливість. Коливання в головному мозку стають більш повільними і ритмічними. Цей стан називається ще «сутінковим», оскільки в ньому людина знаходиться між сном і неспанням. У нормі тета-хвилі пов'язані зі зміною стану свідомості;

- дельта-ритм ( $\delta$ -ритм) – частота коливання варіюється від 1 до 4 Гц, амплітуда розташована в межах 20–200 мкВ (високоамплітудні хвилі).

Отже, на підставі усього вищезазначеного нами була поставлена задача провести експериментальні дослідження процесу діагностування та реалізувати процес розпізнавання критичних ситуацій (наприклад, неуважності оператора) із застосуванням нейромережевих технологій.

**Експериментальні дослідження.** Як енцефалограф у процесі дослідження був використаний



Emotiv EPOC+. Характеристики пристрою наведені нижче.

- Число датчиків: 14 шт.
- Тип датчиків: пасивні, мокрі.
- Батарея: 7–12 годин без підзарядки.
- З'єднання з комп'ютером: Bluetooth.
- MU частина: LSM9DS0.
- Частота дискретизації: 128 Гц.
- Роздільна здатність: 16 біт.

Були виконані заміри мозкових хвиль із відкритими та закритими очима та створено 4 вибірки даних (датасети) у форматі csv: 2 з відкритими та 2 з закритими для навчання та валідації нейромережі. Приклад датасету наведений на рис. 1.

Перша колонка – номер запису в секунду, 2–15 колонки – сигнал від відповідного електроду, 16 – тіки процесора, що відображають час вимірювання. Відповідність розташування електродів до порядку колонок (0 відповідає 2 колонці) наведено на рис. 2.

Необроблені дані на графіку від одного з електродів у разі заміру з відкритими очима наведені на рис. 3 та із закритими – на рис. 4.

Для аналізу даних був вибраний спектральний метод, що являє собою розкладання сигналу на складові частоти (спектр) за допомогою перетворення Фур'є. Потім спектр використовується для машинного навчання нейромережі, яка має розрізняти 2 стани: закриті очі, відкриті.

Перетворення Фур'є – інтегральне перетворення однієї комплекснозначної функції дійсної змінної на іншу. Воно тісно пов'язане з перетворенням Лапласа та аналогічне розкладу в ряд Фур'є для неперіодичних функцій. Це перетворення розкладає функцію на осциляторні функції. Використовується для того, щоб розрахувати спектр частот для сигналів змінних у часі (мова або електрична напруга).

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (1)$$

Формула перетворення Фур'є (1), що буде застосовуватись.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega, \quad (2)$$

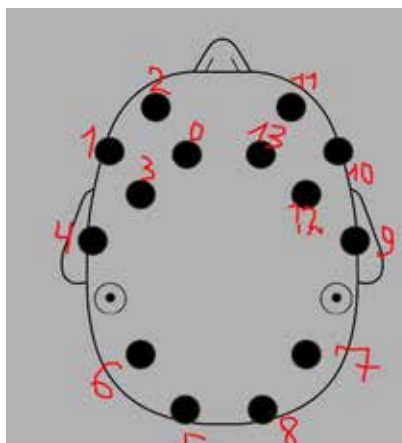


Рис. 2. Розташування електродів в EMOTIV EPOC+

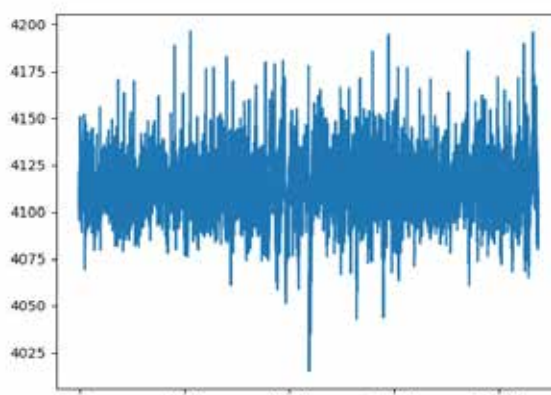


Рис. 3. Необроблений сигнал із відкритими очима

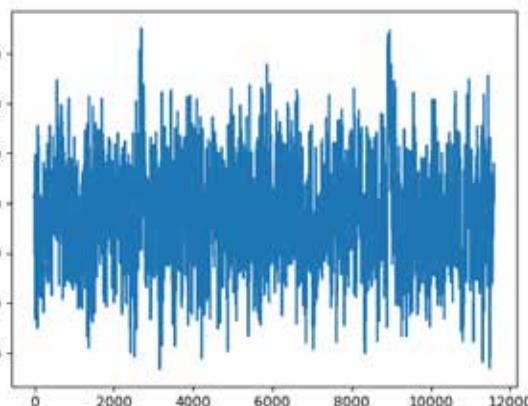


Рис. 4. Необроблений сигнал із закритими очима

18	4134.74389667	4127.496337542	4114.999999713	4136.43275621	4136.191894602	4136.252281891	4133.97492289	4127.30748031	4130.07492289	4134.49717961	4139.74389667	4139.10264091	4133.07492289	4136.7947132	1699999997594931230
19	4136.37943209	4129.10264091	4139.4613257	4134.50037826	4139.30912077	4137.89439746	4149.51382212	4129.84413307	4139.23074896	4139.23074896	4130.30447511	4139.74389667	4130.41320226	4139.44413307	1699999997594931230
20	4131.15318004	4123.20512793	4131.71794896	4127.99413229	4139.41230461	4130.54423364	4124.22072094	4127.1794896	4131.41230461	4131.41230461	4131.53544122	4122.3074896	4140.30447511	4130.70023058	1699999997594931230
21	4135.3074896	4131.53544122	4134.74389667	4134.74389667	4136.7947132	4130.30233313	4130.12020476	4131.41230461	4131.70520909	4131.53544122	4134.74389667	4132.00233742	4137.30051255	4130.30233742	1699999997594931230
22	4139.71794896	4130.61838961	4131.41230461	4130.20812793	4134.20240109	4136.7947132	4137.89439746	4137.89439746	4137.89439746	4137.89439746	4137.89439746	4137.89439746	4137.89439746	4137.89439746	1699999997594931230
23	4137.1794896	4137.89439746	4139.4613257	4131.41230461	4137.89439746	4136.7947132	4134.48392334	4132.82052994	4139.30912077	4139.30912077	4139.30912077	4139.30912077	4139.30912077	4139.30912077	1699999997594931230
24	4137.89439746	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	1699999997594931230
25	4137.89439746	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	1699999997594931230
26	4137.89439746	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	1699999997594931230
27	4137.89439746	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	1699999997594931230
28	4137.89439746	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	1699999997594931230
29	4137.89439746	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	1699999997594931230
30	4137.89439746	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	1699999997594931230
31	4137.89439746	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	1699999997594931230
32	4137.89439746	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	4139.4613257	1699999997594931230

Рис. 1. Датасет

Функцію  $f(t)$ , яка визначається формулою (2), називають зворотним перетворенням Фур'є.

Спектр сигналу з одного з електродів після перетворення Фур'є має вигляд.

З відкритими очима зазначений спектр виглядає так (рис. 5).

Із закритими очима аналогічний спектр змінюється, як це наведено на рис. 6.

По осі  $x$  відображена частота в герцах, по осі  $y$  – амплітуда коливань. Можна чітко побачити шум від побутової мережі в 50 Гц.

Для розпізнавання стану була використана багатошарова нейромережа на бібліотеці Keras. Датасет був поділений на семпли, дискретиза-

цією в 4 секунди, з кожним семплом було виконано перетворення Фур'є, отримані спектри від кожного електроду були об'єднані між собою. Перший семпл після перетворення Фур'є та об'єднання зображений на рис. 7.

Обробка сигналу представлена на рис. 8.

Отримані семпли використовуються для навчання багатошарової нейромережі методом зворотного поширення помилки. По черзі подаються на вхід нейромережі, на єдиний вихід подаються очікувані результати: для відкритих очей 1, для закритих – 0.

Нейромережа написана з використанням бібліотеки Keras та має структуру, наведену в таблиці 1.

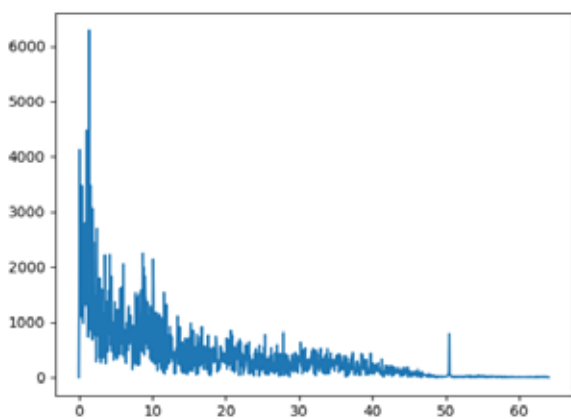


Рис. 5. Спектр сигналу з відкритими очима

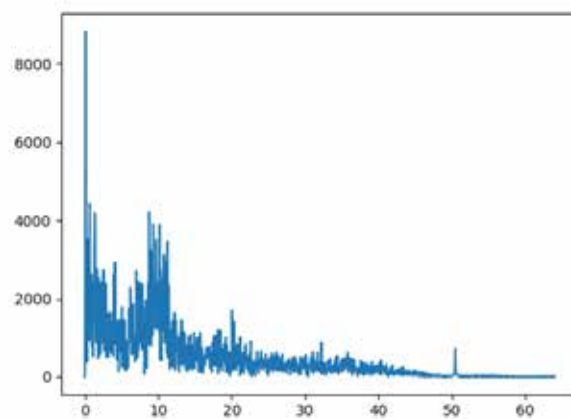


Рис. 6. Спектр сигналу з закритими очима

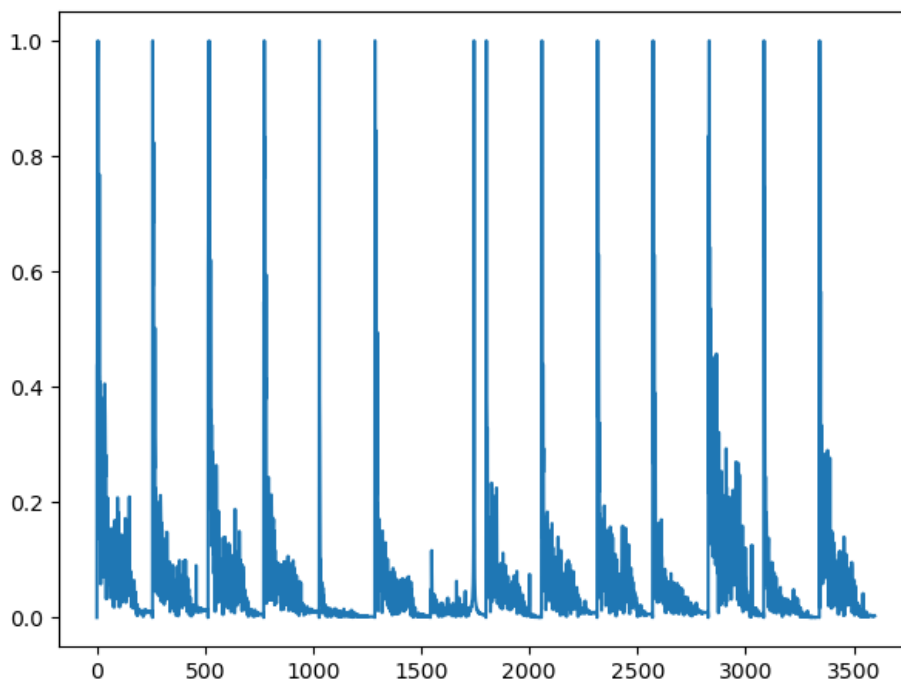


Рис. 7. Оброблений сигнал з усіх електродів



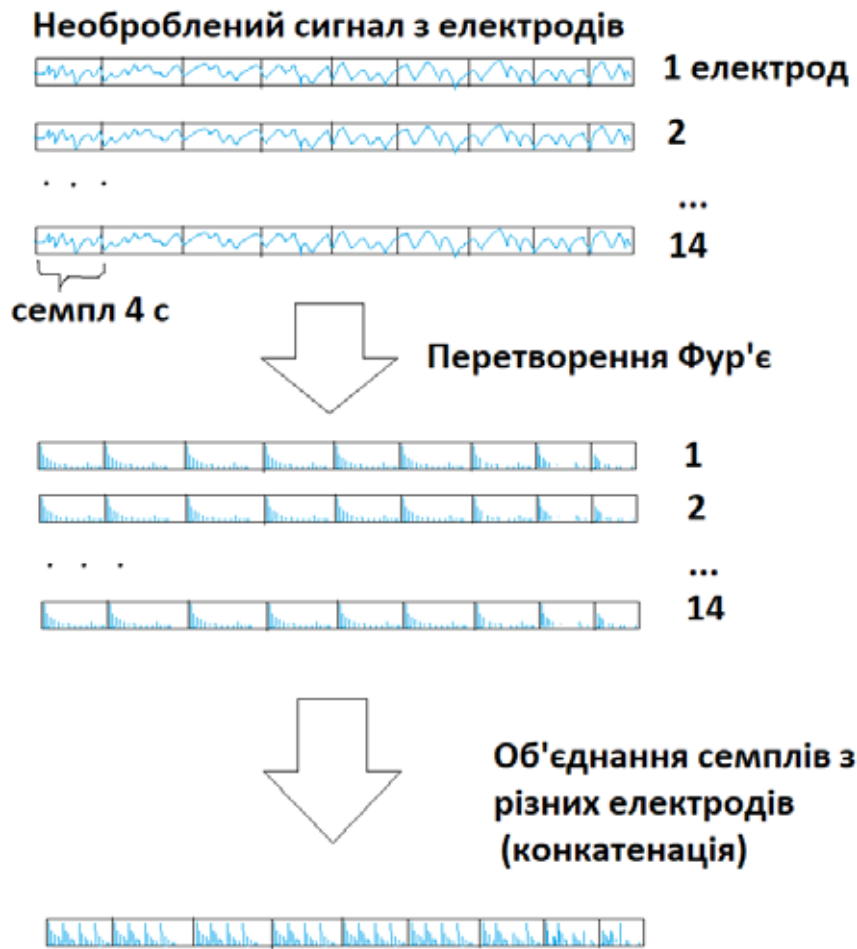


Рис. 8. Обробка сигналу

Таблиця 1

Структура нейромережі

Layer (type)	Output Shape	Param #
input (InputLayer)	(None, 3598)	0
dense_13 (Dense)	(None, 1128)	4059672
dense_14 (Dense)	(None, 292)	329668
dense_15 (Dense)	(None, 130)	38090
dense_16 (Dense)	(None, 10)	1310
output (Dense)	(None, 1)	11
Total params: 4,428,751		
Trainable params: 4,428,751		
Non-trainable params: 0		

3598 входів відповідають сумарній кількості частот з усіх електродів для 1 семплу, нейромережа має 4 шари по 1128, 292, 130, 10 нейронів відповідно. 2 датасета використовуються для навчання, open.csv та close.csv та ще 2 для валідації open2.csv, close2.csv. Кількість епох навчання – 15000. Після навчання виконується валідація на датасетах, що не брали участі в навчанні. Результуюча помилка при валідації становить 0.0409, що є гар-

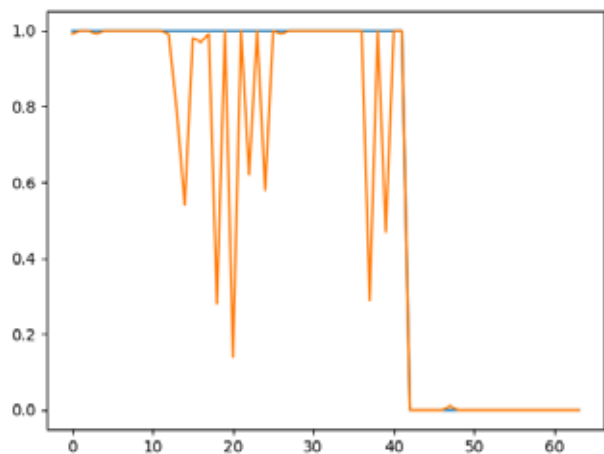


Рис. 9. Результат валідації

ним результатом. Результат валідації зображено на графіку (рис. 9).

Синя лінія відображає очікуване значення, оранжева – результат на виході нейромережі.

Програмний код для навчання нейромережі мовою Python:

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import keras
from keras.models import Model
from keras.layers import Input, Embedding
from keras.layers import Dense, Dropout
from scipy.fft import fft, fftfreq, rfft, rfftfreq
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy
import sys

from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler

def furie(dat,scaler,scl=0):
    yres = []
    index = 0
    SAMPLE_RATE = 128
    DURATION = 4
    N = SAMPLE_RATE * DURATION
    xf = rfftfreq(N, 1 / SAMPLE_RATE)
    #Розбиття сигналу на семпли
    for index in range(0,len(dat)-len(dat)%N,N):
        #Перетворення Фур'є для кожного семплу
        yf = rfft(dat.values[index:index+N])
        yf[0]=0
        yf = numpy.abs(yf)

    if scl>0:
        yf2 = []
        for i in range(0,len(yf),int(len(yf)/(scl))):
            yf2.append(sum(yf[i:i+int(len(yf)/(scl))]))
        yf=numpy.array(yf2[:int(scl)])

    yf = yf.reshape((len(yf), 1))
    #Нормалізація
    yf = scaler.fit_transform(yf)
    yf = yf.reshape((len(yf)))

    yres.append(yf)
    return xf, yres

def furieconc(dat,scl=0):
    scaler=MinMaxScaler()
    af = []
    for i in dat:
        #Перетворення Фур'є
        _f = furie(dat[i],scaler,scl)
        af.append(f)
    #Конкатинація семплів з різних електродів
    res = numpy.concatenate((af),axis=1)
    return res

electrods = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14]
#датасети для навчання
data1 = pd.read_csv("open.csv", header=None,
                    usecols=electrods)
data2 = pd.read_csv("close.csv", header=None,
                    usecols=electrods)

#датасети для валідації
data3 = pd.read_csv("open2.csv", header=None,
                    usecols=electrods)
data4 = pd.read_csv("close2.csv", header=None,
                    usecols=electrods)

#обробка сигналу
f1 = furieconc(data1)
f2 = furieconc(data2)
f3 = furieconc(data3)
f4 = furieconc(data4)

#Об'єднання датасетів навчання
training_X = numpy.concatenate((f1,f2))
#Заповнення масиву очікуваних результатів
training_Y = numpy.zeros((len(f1)+len(f2),1))
training_Y[:len(f1)]=1

#Об'єднання датасетів валідації
test_X = numpy.concatenate((f3,f4))
#Заповнення масиву очікуваних результатів
test_Y = numpy.zeros((len(f3)+len(f4),1))
test_Y[:len(f3)]=1

#Параметри нейромережі
activation_function = 'relu'
optimizer = 'adam'
loss_function = 'mean_squared_error'
batch_size = int(len(training_X))
num_epochs = 15000

#Bxið
inp = Input(shape=(len(training_X[0]),), name =
'input')
x = Dense(1128, activation = activation_function)
(inp)
#x = Dropout(0.05)(x)
x = Dense(292, activation = activation_function)
(x)
#x = Dropout(0.05)(x)
x = Dense(130, activation = activation_function)
(x)
#x = Dropout(0.05)(x)
x = Dense(10, activation = activation_function)(x)
#Buxið

```

```
output = Dense(1, name='output', activation =
'sigmoid')(x)
model = Model(inputs=[inp], outputs=output)
print(model.summary())
model.compile(optimizer = optimizer, loss = loss_
function)
```

*#Навчання мережі*

```
model.fit(
{'input': training_X},
training_Y,
batch_size = batch_size, epochs = num_epochs)
```

*#Валідація*

```
res = model.evaluate({'input': test_X}, {'output':
test_Y}, batch_size = batch_size)
```

**print**(res)

*#Збереження навченої нейромережі на диск*

```
model.save('model.h5')
```

*#Тестування*

```
y_predict = model.predict({'input': test_X})
```

```
y_predict = numpy.around(y_predict,2)
```

```
plt.plot(test_Y)
```

```
plt.plot(y_predict)
```

```
plt.show()
```

Оптимізація топології нейромережі була виконана методом підбору з кроком, що зменшуються в процесі оптимізації. Створюється мережа з заданими параметрами, виконується її навчання, підрахунок помилки, змінюється кількість нейронів у кожному шарі в меншу та більшу сторону на заданий крок, знаходиться мінімальна помилка, зменшується крок, процедура повторюється.

Фрагмент програмного коду для оптимізації:

```
param = [1128,292,130,201]
```

```
for nm in range(500,0,-1):
```

```
print(nm)
```

```
for p in range(len(param)):
```

```
brutex = []
```

```
brutey = []
```

```
step = nm
```

```
kshift = 4
```

```
if param[p] < step:
```

```
strt = param[p]
```

```
else:
```

```
strt = param[p] – step*kshift
```

```
if strt < 1:
```

```
strt = 1
```

```
end = param[p]+step*kshift
```

```
for n in range(strt,end,step):
```

```
param[p] = n
```

```
xa = numpy.concatenate((f1,f2))
```

```
ya = numpy.zeros((len(f1)+len(f2),1))
```

```
ya[:len(f1)]=1
```

```
training_X = xa
```

```
training_Y = ya
```

```
xa2 = numpy.concatenate((f3,f4))
```

```
ya2 = numpy.zeros((len(f3)+len(f4),1))
```

```
ya2[:len(f3)]=1
```

```
test_X = xa2
```

```
test_Y = ya2
```

```
activation_function = 'relu'
```

```
optimizer = 'adam'
```

```
loss_function = 'mean_squared_error'
```

```
batch_size = int(len(training_X))
```

```
num_epochs = 1000
```

```
inp = Input(shape=(len(training_X[0]),), name =
'input')
```

```
x = Dense(param[0], activation = activation_
function)(inp)
```

```
x = Dense(param[1], activation = activation_
function)(x)
```

```
x = Dense(param[2], activation = activation_
function)(x)
```

```
x = Dense(param[3], activation = activation_
function)(x)
```

```
output = Dense(1, name='output', activation =
'sigmoid')(x)
```

```
model = Model(inputs=[inp], outputs=output)
```

```
#print(model.summary())
```

```
print(param[p])
```

```
model.compile(optimizer = optimizer, loss = loss_
function)
```

```
model.fit(
```

```
{'input': training_X},
```

```
training_Y,
```

```
batch_size = batch_size, epochs = num_epochs,
```

```
verbose=0)
```

Була розроблена програма, що в реальному часі визначає наявність ситуації з закритими очима оператора та подає звуковий сигнал, якщо очі закриті. Затримка спрацьовування становить 4 секунди та дорівнює довжині семплу, але в перспективі можна зробити неперервний аналіз.

```
def furieconc(dat,scl=0):
```

```
scaler=MinMaxScaler()
```

```
af = []
```

```
for v in dat:
    _,f = furie(v,scaler,scl)
    af.append(f)
    #print(af)
    res = numpy.concatenate((af),axis=1)
    return res

#Завантаження моделі
model = keras.models.load_model('eyes2.h5')
print(model.summary())

cyHeadset = EEG()

counter = 0
frame = []
last = [0.5,0.5]
while 1:
    while tasks.empty():
        pass
    _, data = cyHeadset.get_data()
    counter += 1
    #Збереження даних у масив
    frame.append(data)
    #Обробка даних кожні 4 секунди
    if counter >= 128*4:
        frame = numpy.array(frame)
        #Формування семплу
        frame = numpy.transpose(frame)
        #Нормалізація, перетворення Фур'є, об'єднання
        ха = furieconc(frame)
        #Виконання розпізнавання
        y_predict = model.predict({'input': ха})[0][0]
        print(y_predict)
        #Поріг спрацьовування сигналу
        if y_predict < 0.2:
            #Звуковий сигнал
            playsound("1.mp3")
            #print(frame)
            counter = 0
            #Очистка масиву із семплом
            frame = []
            #Збереження попередніх результатів розпізнавання
            last[1] = last[0]
            last[0] = y_predict
```

**Висновки.** Результати дослідження показали достатню ефективність запропонованого методу. Точність становить 96%. Отже, спектральний аналіз та розпізнавання енцефалограми за допомогою нейромережі є ефективними та можуть бути використані для системи контролю уважності в реальному часі.

#### Список літератури:

1. Преобразование Фурье, как метод анализа ЭЭГ-сигналов. URL: <https://cmi.to/методи/анализ-фурье/>
2. Преобразования Фурье для обработки сигналов с помощью Python. URL: <https://proglib.io/p/preobrazovaniya-fure-dlya-obrabotki-signalov-s-pomoshchyu-python-2020-11-03>
3. Ильясов Л.В. Биомедицинская измерительная техника : Учеб. пособие для вузов. Москва : Высш. шк., 2007. 342 с.
4. Основи біомедичного радіоелектронного апаратобудування : навчальний посібник / Злепко С.М., Павлов С.В., Коваль Л.Г. та ін. Вінниця : ВНТУ, 2011. 133 с.
5. Биотехнические системы: теория и проектирование : учебн. пособие / [Ахутин В. М., Немирко А. П., Першин Н. Н. и др.]. Ленинград : ЛГУ, 1981. 220 с.; Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования / И.В. Кузьмин, В.А. Кедрус. Киев : Вища школа, 1977. 180 с.
6. Мещанінов С.К. Електронні методи і засоби біомедичних вимірювань : навчальний посібник / С.К. Мещанінов, В.М. Співак, А.Т. Орлов. Київ : Кафедра, 2015. 211 с.
7. Лобасюк Б.А., Карпинская О.Н., Ружицкая. М.С. Практикум по электроэнцефалографии. ОНУ. 2016. 57 с.
8. Чернышева Е.Г., Чернышев Б.В. Практические занятия по прикладной психофизиологии : учебно-методическое пособие для студентов психологического факультета ГУ- ВШЭ. Москва, 2010. 54 с.
9. Мозг и его ритмы – базовые знания. URL: <https://nodus.ua/tsentr/nauka-i-praktyka/neuroreabilitatsiya/mozg-i-ego-ritmy-bazovye-znaniya/>

#### Kupin A.I., Hradovyi O.V. INTELLECTUAL OPERATOR ATTENTION CONTROL SYSTEM BASED ON ENCEPHALOGRAPH

*The development of methods for classifying the states of electrical activity of the human brain associated with the state of consciousness is an urgent interdisciplinary task. One of the most effective approaches to solving this problem is the use of algorithms based on artificial neural networks. Objective: to develop a method for recognizing and classifying electroencephalographic patterns corresponding to different states of consciousness such as fatigue and inattention, based on artificial neural networks. Methods: classifiers*

*based on linear neural networks, multilayer perceptrons are considered. A review of the principle of operation and promising areas of application of the encephalograph. A retrospective analysis of literature sources on mathematical methods and hardware and software tools for encephalogram analysis. The method of encephalogram recognition by means of a neural network in the attention control system is described. Based on the Fourier transform, the spectral characteristics of the encephalogram were studied. The neural network architecture for realization of process of recognition of signs of fatigue of the operator in real time is offered. One of the methods of optimization of the neural network topology is considered. An algorithm for teaching artificial neurostructure is selected. The software implementation of all stages of the recognition process is performed. The encephalogram was recorded, measurement data were collected and structured for neural network training and validation. Based on the collected data, neural network training and validation of the obtained recognition results were performed. Real-time recognition software testing. Graphs showing the results of recognition are constructed. Computer simulation of the process of recognizing critical situations has been performed. Calculations of recognition accuracy indicators are made. The adequacy and effectiveness of the proposed approaches are proved.*

**Key words:** *neural network, encephalograph, attention control, spectral analysis, Fourier transform.*

*Лінник І.С.*

Державний університет «Одеська політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В СИСТЕМІ РЕГУЛЮВАННЯ МОДУЛЬНОЇ КОТЕЛЬНОЇ

*У роботі досліджено наслідки інтеграції нечіткого регулятора у автоматичну систему регулювання модульною котельнею. Здебільшого модульна котельня являє собою послідовно з'єднані невеликі котли.*

*За дотриманням необхідної технологічної температури слідкують локальні пропорційно-інтегральні (ПІ) регулятори, кожен з яких має власне завдання. Робота такої моделі є досить простою і не представляє великого інтересу, тому для розширення функціоналу систем регулювання до неї було інтегровано блок із нечіткою логікою. Призначенням цього блоку є індивідуальне коригування завдання для кожного модуля. Теоретично результатом такого синтезу буде запобігання експлуатації обладнання на підвищеній потужності за рахунок розподілення надлишкового навантаження, що призводить до збільшення ймовірного строку експлуатації котлоагрегатів і уникнення небажаних економічних збитків.*

*Як експеримент була здійснена спроба повністю замінити локальні ПІ регулятори котлів і перекласти їх функції на нечіткий регулятор. Такий регулятор дає змогу запрограмувати будь-яку кількість логічних виразів без чітких чисельних умов. Подібне ускладнення системи регулювання є досить нетривіальною задачею через збільшення удвічі кількості вхідних сигналів, які в кілька разів збільшують кількість правил. Це на порядок ускладнює підбір оптимального виду та меж функцій належності, що визначають якість перехідного процесу регулювання та впливають як на локальні відхилення від завдання, так і на кінцеве.*

*За результатами моделювання зроблено висновок про переваги інтеграції нечіткої логіки у розглянуту систему та щодо наявності сенсу у повному заміщенні групи ПІ регуляторів на один нечіткий.*

**Ключові слова:** автоматична система регулювання, модульна котельня, ПІ регулятор, нечіткий регулятор, синтез, теплообмінник, двоконтурна система.

**Постановка проблеми.** Фізичний і моральний знос більшості існуючих в Україні котельень за оцінками фахівців складає в середньому 60-70%, не кращим є і стан теплотрас. Це призводить до низької ефективності систем тепlopостачання, вимагає комплексної реконструкції та технічного переобладнання.

Одним зі шляхів вирішення цього питання є застосування блочно-модульних, максимально автоматизованих котельних установок, що забезпечують роботу обладнання за заданою програмою з регулюванням подачі тепла залежно від температури зовнішнього повітря. Підвищений попит на транспортабельні газові котельні продиктований економічною доцільністю. Забезпечення споживачів від централізованих джерел опалення пояснюється раціональними причинами, серед яких: суттєва економічна вигода за рахунок відмови від використання мереж тепlopостачання, економія на дорогому підключенні до центральних магістралей, незалежність від сезонності подачі тепла і гарячої води, виключення ризику

припинення подачі теплової енергії внаслідок аварійних ситуацій, автономність регулювання необхідної температури опалювальної системи і гарячого водопостачання. Тому оптимальне регулювання та підвищення економічної ефективності є актуальними питаннями для систем опалення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В управлінні складними об'єктами, що працюють у нестационарних умовах, адаптаційні контролери, які реалізують стандартні закони ПІ або PID, знайшли широке застосування. Адаптивні контролери від зарубіжних і вітчизняних виробників здебільшого реалізують метод Зіглера-Нікольса [1]. Слід зазначити, що цей метод передбачає виведення об'єкта в області автоколивань внаслідок переходу до Р-закону та грубої зміни коефіцієнта посилення Кг. Однак значна кількість технологічних процесів в робочих умовах заважає автоколивальному режиму.

Використання в об'єктах знаходять і нечіткі моделі та алгоритми управління [3; 4]. Відомо, що нечітке управління засноване на використанні

не стільки аналітичних або теоретичних моделей, скільки на практичному застосуванні знань кваліфікованих фахівців, представлених у формі лінгвістичних баз правил. Нечітке управління ефективно у випадках невизначеності параметрів об'єктів, коли існує певний досвід експертів з управління і налаштування автоматизованої системи регулювання (далі – АСР). Теорія нечіткої логіки дозволяє використовувати знання фахівців-налагодчиків з метою поліпшення процесів управління і надання допомоги (супервізорний режим) з налаштування типових регуляторів. Таким чином, завдання пошуку оптимального методу адаптації залишається відкритим.

**Постановка завдання.** Ціль роботи у тому, щоб поєднати два типи регуляторів, а саме ПІ і нечіткий, налаштувати їх так, щоб уникнути перевантаження котла, який буде намагатися самотужки погасити збурення та перерозподілити навантаження між усіма порівну.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Модульна котельня – це автономна котельня, яка зроблена як окремий транспортабельний модуль або блок модулів із комплектом усього необхідного обладнання залежно від потреб і призначення.

Оснащення сучасних блочно-модульних котельень включає в себе засоби автоматичного регулювання режиму роботи і дистанційні системи управління. Таким чином передбачається можливість роботи обладнання без постійної присутності оператора. Відмінною особливістю є швидкість введення в експлуатацію, низька собівартість і економічність експлуатації. Модульні котельні призначені для забезпечення потреб в опаленні, технологічному парі і гарячому водопостачанні підприємств та організацій, що зазнають дефіциту енергетичних ресурсів або потребують більш якісних і економічно вигідних джерел теплопостачання. Модульні котельні з'єднуються зі споживачами за допомогою теплотраси і/або

паропроводів. Основним пристроєм модульної котельні є опалювальний котел.

Тепловий контур блочно-модульної котельні може з'єднуватися з системою опалення об'єкта безпосередньо (відкритий тепловий контур або через гідравлічну стрілку), а також за незалежною схемою (через теплообмінник). Перше рішення дешевше, а друге – надійніше, оскільки в цьому випадку котельне обладнання захищене від можливого негативного впливу з боку теплових мереж об'єкта: забрудненого теплоносія, високого тиску, перепадів температур.

Теплообмінники (далі – ТА) енергоустановок є великогабаритним, металомістким і дорогим обладнанням, що істотно впливає, а в окремих випадках і визначає ефективність і надійність роботи теплових, атомних електростанцій та їх додаткового обладнання загалом.

Удосконалення конструкцій сучасних ТА розвивається в напрямках інтенсифікації тепловіддачі і підвищення компактності, підвищення максимальних значень тиску і температури теплоносіїв. Переважною є кожухотрубчатая конструкція ТА, але прогресуючу конкуренцію їй складають пластинчаті теплообмінники, які досягли максимальних значень за температури теплоносіїв до 500 і тисків близько 40 бар. Загалом модульні котельні можуть забезпечувати теплоносієм кілька контурів теплопостачання. В цьому випадку для оптимізації роботи рекомендується встановлювати регулююче обладнання, яке автоматично підтримує температурний режим індивідуально для кожного контуру.

Автоматична система регулювання об'єкту була змодельована у середовищі Simulink і представлена на рисунку 1. Вона представляє собою три послідовно з'єднаних котли.

Наступним кроком було налаштування локальних регуляторів для кожного котла (внутрішні контури) [2] та додання зовнішнього контуру регулювання у виді нечіткого регулятора. Метою інте-

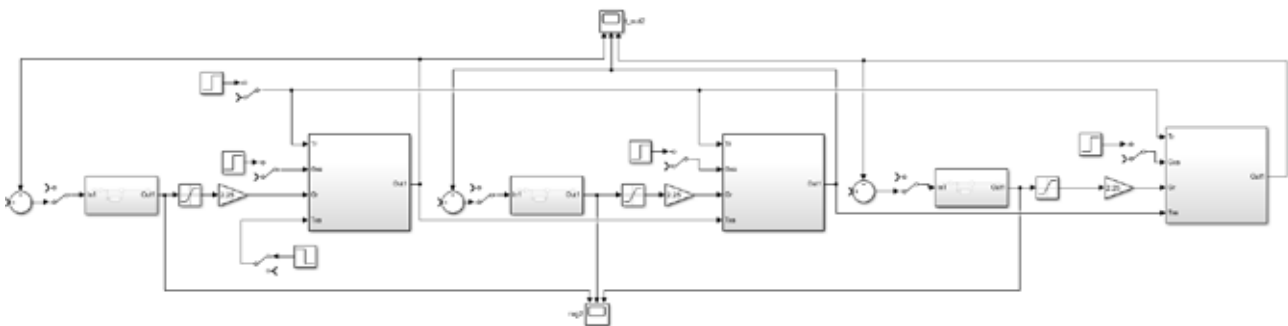


Рис. 1. Математична модель модульної котельні

градії було розподілення стрибків навантаження у мережі між трьома котлами для наближення їх режиму роботи до номінального, таким чином подовжуючи строк працездатності. Для коректної роботи нечіткого регулятора у такій системі його необхідно забезпечити чотирма інформаційними вхідними сигналами:

1. Температура теплоносія на вході до системи.
2. Температура теплоносія між першим і другим котлами.
3. Температура теплоносія між другим і третім котлами.
4. Температура теплоносія на виході системи.

Виходами регулятора будуть сигнали коригування завдання для внутрішніх контурів регулювання. Структура АСР зображена на рисунку 2.

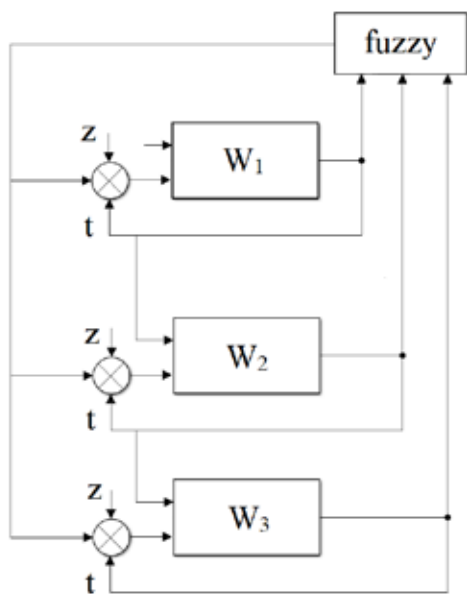


Рис. 2. Структурна схема АСР з інтеграцією нечіткого регулятора

$W_{1,2,3}(s)$  – передатні функції котла;  
 fuzzy – нечіткий регулятор;  
 $z$  – завдання для регулятора котла;  
 $t$  – зворотний зв'язок за температурою.

Для дослідження системи скористаємося середовищем Simulink і схемою, наведеною на рисунку 3.

Останнім етапом дослідження й спроба повної заміни функцій систем локального регулювання нечітким регулятором. Тепер до вихідних сигналів нечіткого регулятора додаються сигнали керування подачею палива до кожного котла. Таким чином блок з нечіткою логікою повинен утримувати температур в заданих межах і коригувати завдання самому собі. У зв'язку з тим його база правил розширюється, значно ускладнюючи процес налаштування та підбір оптимальних меж функцій належності. Після встановлення мінімальної необхідної кількості правил та налаштування регулятора отримуємо модель на рисунку 4.

Подаємо збурення у виді -3 градусів. Отримані результати можна подивитися на рисунку 5. На ньому зображені виходи регуляторів у моделі з поєднанням ПІ з нечітким регулятором та одного нечіткого регулятора.

Як видно з рисунка 5, додання нечіткого регулятора до класичної схеми регулювання дає можливість рівномірного розподілення навантаження. Повна заміна система регулювання на нечітку показує схожий результат, з дещо більш нерівномірним розподіленням.

Кінцеві результати перехідного процесу регулювання температури на кожному з виходів котлів представлені на рисунку 6.

Перехідний процес у двухконтурній АСР відповідає вимогам з якості, перерегулювання відсутнє, похибка відсутня, коливальності майже немає, час регулювання швидкий. Перехідний процес, який

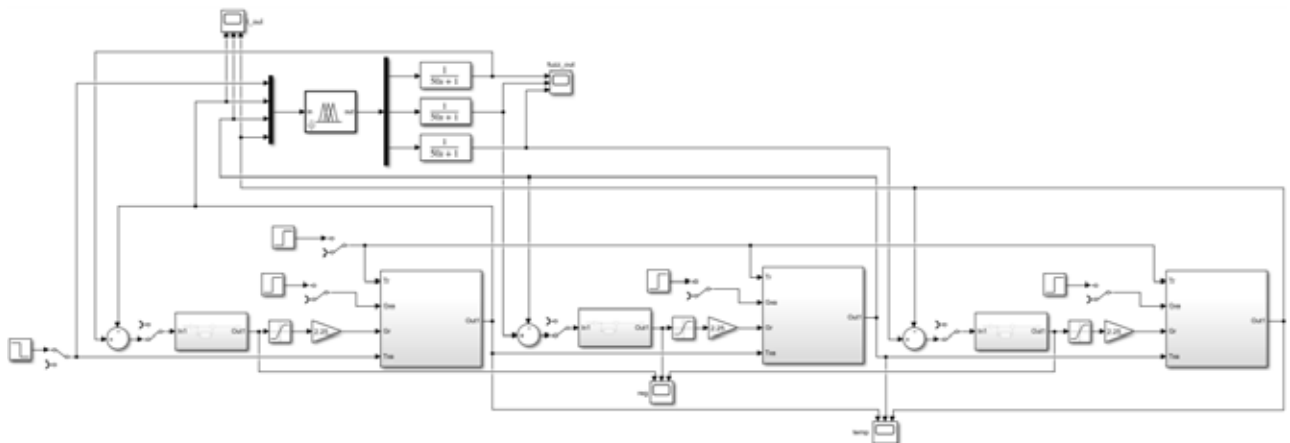


Рис. 3. Автоматична система регулювання модульною котельнею з поєднанням ПІ та нечітким регуляторами



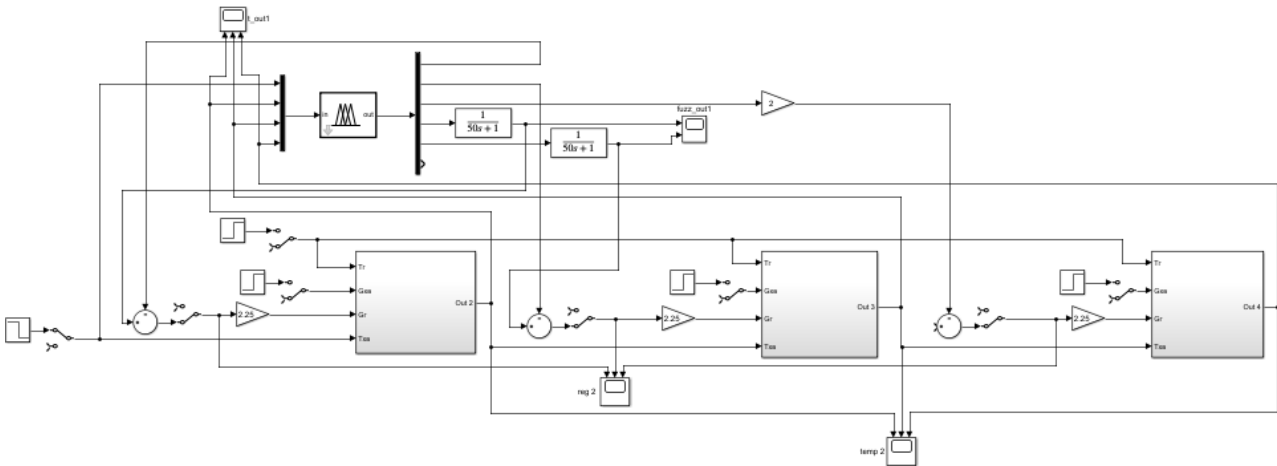


Рис. 4. Автоматична система регулювання модульною котельнею з нечітким регулятором

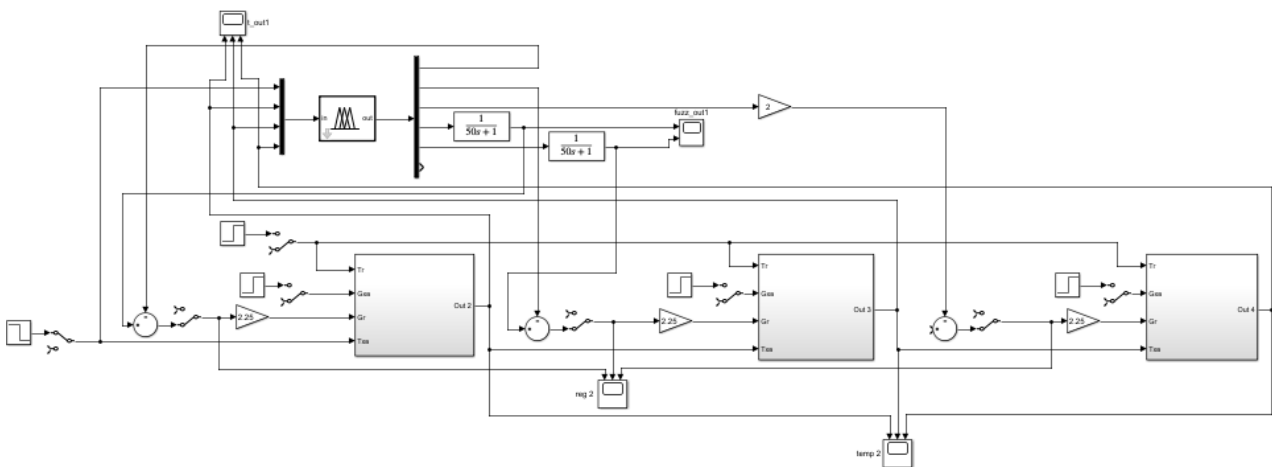


Рис. 5. Порівняння виходів регуляторів ПІ з нечітким регулятором зліва, один нечіткий справа

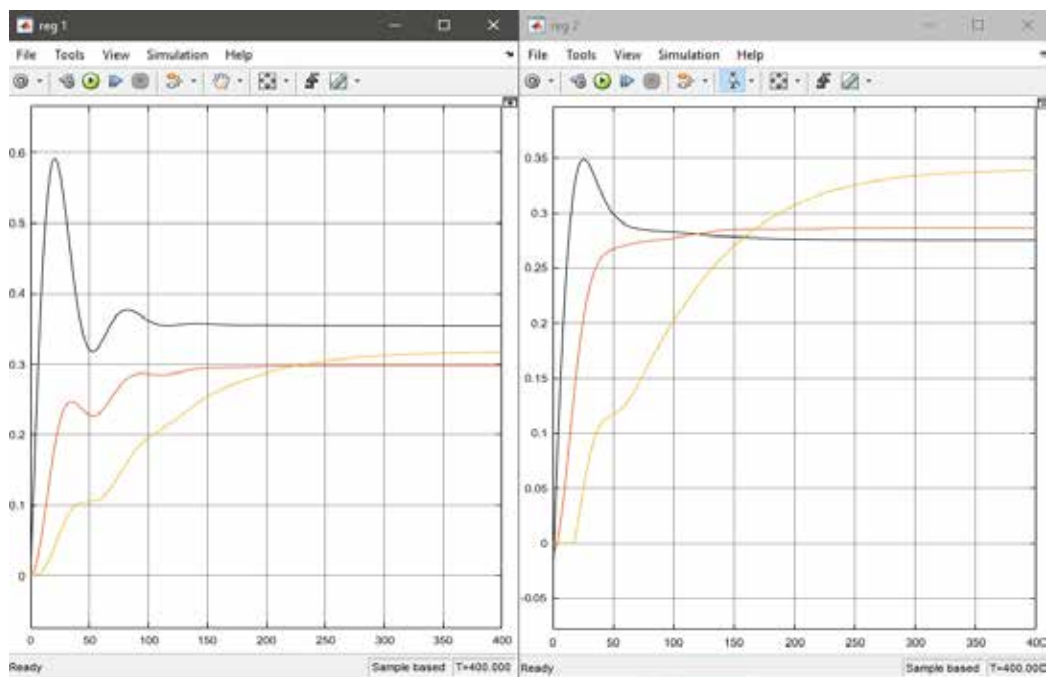


Рис. 6. Порівняння ППР температури: двухконтурна АСР з нечітким – зліва, АСР на базі нечіткої логіки – справа

демонструє система на базі нечіткої логіки: присуття незначної похибки регулювання – 5 % від величини збурення, що є прийнятним для даного технологічного процесу, перерегулювання відсутнє, коливальність відсутня, час регулювання швидкий, дещо повільніше ніж на попередньому графіку.

**Висновки.** У обох випадках було досягнуто рівномірного розподілу потужності котлів. Виходячи з цього, можна затвердити, що використання нечіткого регулятора без ПІ можливе. Але зі зростанням контрольованих об'єктів, складність налаштування зростає, що може впливати як на проміжний, так і на кінцевий результат. Якщо у об'єктів не багато виходів, для легшого налаштування і точнішого очікуемого

результату більш підходить схема з поєднанням регуляторів. Крім цього, при повному переході на нечітку логіку, спостерігається незначна похибка регулювання, що робить таку систему непридатною для деяких технологічних процесів, де необхідне точне підтримання регульованої величини або наявні значні збурення. Можна припустити, що дана похибка виникає внаслідок неоптимального налаштування нечіткого регулятора, тому рекомендується додаткове налаштування, використання функції автоматичного підбору параметрів або перехід на більш просту систему. У всякому разі використання останньої системи регулювання у теплофікаційних процесах цілком можливе через не такі жорсткі вимоги до якості регулювання.

#### Список літератури:

1. Особенности П, ПИ и ПИД регулирования. [Электронный ресурс] URL: <https://www.ao-tera.com.ua/list/ru/technology/0/246.html>
2. Кон Л. И. Методичні вказівки й таблиці для вибору налаштувань ПІ та П регуляторів в одноконтурних системах регулювання теплових об'єктів з запізненням. Одеса, ОНПУ, 2003. 127 с.
3. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech. – С. – Птб.: БХВ, 2003. – 720 с.
4. Мелихов А.Н. и др. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
5. Модульная котельная. [Электронный ресурс] URL: [http://ru.teplowiki.org/wiki/Модульная\\_котельная](http://ru.teplowiki.org/wiki/Модульная_котельная).
6. К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков Теплообменники энергетических установок. Учебное электронное издание Екатеринбург: УрФУ 2015. 208 с.
7. Справочник «Промышленное газовое оборудование» / Издание 6-е, переработанное и дополненное. Под редакцией Е. А. Карякина, 2013–1193 с., Научно-исследовательский центр промышленного газового оборудования «Газовик».
8. Санцевич В.И. Блочно-модульная водогрейная котельная – ТетраСистемс, 2013. – 64с.
9. Барановский Н. В., Коваленко Л. М., Ястребенецкий А. Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. М., «Машиностроение», 1973, 288 с.
10. Бараненко А. В., Цветков О. Б., Лаптев Ю. А., Ховалыг Д. М. Миниканальные теплообменники в холодильной технике. (рус.) // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – СПб.: НИУ ИТМО, 2014. – Вып. 3. – ISSN 2310-1148
11. Краснов, В.И. Повышение эффективности теплоснабжения зданий и сооружений путём замены в ЦТП кожухотрубных теплообменников на пластинчатые / В.И. Краснов // Энергобезопасность в документах и фактах. – 2006. – № 2.

#### **Linnik I.S. INVESTIGATION OF FUZZY LOGIC POSSIBILITIES IN MODULATING BOILER CONTROL SYSTEM**

*In this work, the consequences of the integration of the fuzzy controller into the automatic control system of the modular boiler room were investigated. Typically, a modular boiler room is a series of small boilers connected in series. The observance of the required technological temperature is monitored by local proportional-integral (PI) regulators, each of which has its own task. The operation of such a model is quite simple and is not of great interest, so to expand the functionality of control systems, a block with fuzzy logic was integrated into it. The purpose of this block is to individually adjust the task for each module. Theoretically, the result of such a synthesis will be the prevention of operation of equipment at high power due to the distribution of excess load, which in turn leads to an increase in the probable service life of boilers and avoid unwanted economic losses. As an experiment, an attempt was made to completely replace the local PI controllers of boilers, and to transfer their functions to a fuzzy controller. This controller allows you to program any number of logical expressions without clear numerical conditions. Such a complication of the control system is a rather non-trivial task, due to doubling the number of input signals, which in turn increases the number of rules several*

*times. This makes it much more difficult to select the optimal type and boundaries of membership functions that determine the quality of the transitional process of regulation and affect both local deviations from the task and the final one. Based on the simulation results, a conclusion is made about the advantages of integrating fuzzy logic into the considered system and about the presence of meaning in the complete replacement of the group of PI regulators by one fuzzy one.*

**Key words:** *automatic control system, modular boiler room, proportional-integral regulator, fuzzy logic regulator, synthesis, heat exchanger, double-circuit system.*

**Левкін Д.А.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

**Бережна Н.Г.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

**Лук'янов І.М.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

**Левкін А.В.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

## МАТЕМАТИЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ

*У статті виконано математичне моделювання задачі термічної дії на багатошарові технічні системи. Авторами розроблено розрахункову математичну модель процесу дії, яка представляє собою нелокальну крайову задачу для системи еволюційних псевдодиференціальних рівнянь з інтегральною умовою. Наведений один із можливих підходів для чисельної реалізації розглянутих крайових задач. Розроблено дискретну модель оцінки стану багатошарових технічних систем, які містять локальні, зосереджені, дискретні джерела дії температурних полів. При цьому врахована багатошарова структура модельованих систем і специфічні особливості процесу дії. Технічні характеристики випромінювачів задані з урахуванням попередньої експертної оцінки параметрів систем.*

*Провівши дослідження крайових задач, авторами отримані і обґрунтовані умови коректності параболічних крайових задач для систем еволюційних диференціальних і псевдодиференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами у поліслої. При цьому результати статті можливо без істотних змін використати для обґрунтування коректності крайових задач для систем псевдодиференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами. Застосування зазначених у роботі умов дозволить гарантувати існування і єдність розв'язків диференціальних рівнянь із крайових задач, що моделюють стан багатьох технічних, біотехнологічних, механічних та інших систем під дією джерел навантаження.*

*Як приклад широкого використання результатів цієї роботи автори стверджують про коректність розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей біотехнологічного процесу лазерної дії на ембріон. У статті наведені приклади кількох коректних крайових задач для систем диференціальних рівнянь. Результати досліджень можна застосовувати для підвищення якості автоматизації процесу моделювання та оптимізації багатошарових систем.*

**Ключові слова:** математична модель, крайова задача, псевдодиференціальні рівняння, коректність, оптимізація.

**Постановка проблеми.** У зв'язку з нестандартною геометричною формою досліджуваних об'єктів і технічними характеристиками джерел дії на багатошарові технічні системи виникають певні труднощі при оптимізації таких систем. До них відноситься і проблема з існуванням єдиного розв'язку нелокальних крайових задач систем еволюційних диференціальних і псевдодиференціальних рівнянь, які описують стан досліджуваного об'єкта. Проблема коректності таких задач пов'язана, зокрема, з проблемою оцінки знаменників у правій частині основного диференціального рівняння. Нелокальні крайові задачі використовують при математичному моделюванні

більшості технічних, механічних, гідродинамічних і біотехнологічних систем, які містять джерела навантаження фізичних полів.

Авторами статті визначено і теоретично обґрунтовано умови коректності нелокальних крайових задач для параболічних еволюційних диференціальних і псевдодиференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами у поліслої. Наявність і виконання зазначених у цій роботі умов дозволяє гарантувати, наприклад, коректність розрахункової математичної моделі для ембріона під дією лазерним променем. Це дасть можливість підвищити якість біотехнологічного процесу трансплантації клітин за рахунок збільшення точності

оптимізації параметрів випромінювачів. Застосування результатів наведених досліджень представлено на конкретних прикладах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Дослідженню нелокальних крайових задач для систем диференціальних і псевдодиференціальних рівнянь, здійсненню розрахунку та оптимізації параметрів технічних, біотехнологічних і транспортних систем присвячені наукові публікації [1–9]. У роботах [1; 2] отримані умови коректності задачі Коші для диференціальних і псевдодиференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами. Отриманий результат вдосконалений авторами публікації [3] для обґрунтування коректності крайових задач систем диференціальних рівнянь у поліслої.

Розв’язанню дискретних задач геометричного проектування присвячені результати роботи [4]. У публікації [5] наведені дослідження з використання лазерних технологій для підвищення експлуатаційної стійкості сталей і сплавів. Питання розрахунку й оптимізації технічних параметрів лазерних випромінювачів у багатошаровому мікробіологічному середовищі досліджені авторами роботи [6]. Наукові публікації [7; 8] містять питання щодо впливу кріоконсервування ембріонів на їхній стан перед подальшими маніпуляціями з клітинами. У публікації [9] здійснене моделювання динаміки протікання процесу обробки заявок на транспортне обслуговування і сам процес транспортного обслуговування в логістичних ланцюгах.

У цій публікації авторами визначені і досліджені умови коректності нелокальних крайових задач для систем параболічних еволюційних диференціальних і псевдодиференціальних рівнянь з інтегральною умовою у поліслої. Отримані результати проілюстровані на конкретних прикладах.

**Постановка завдання.** Метою статті є запропонувати умови коректності крайових задач з інтегральною умовою для систем параболічних еволюційних диференціальних і псевдодиференціальних рівнянь у поліслої, що дасть можливість гарантувати адекватність прикладних оптимізаційних математичних моделей для багатошарових технічних і біотехнологічних систем під дією джерел навантаження.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Розглянемо крайові задачі:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A\left(t, \frac{\partial}{\partial x}\right)u(x,t), & 0 \leq t \leq T \\ \int_0^T B\left(t, \frac{\partial}{\partial x}\right)u(x,t) d\mu(t) = \varphi(x) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = A\left(t, \frac{\partial}{\partial x}\right)u(x,t) + f(x,t), & 0 \leq t \leq T, \\ \int_0^T B\left(t, \frac{\partial}{\partial x}\right)u(x,t) d\mu(t) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $A\left(t, \frac{\partial}{\partial x}\right)$  і  $B\left(t, \frac{\partial}{\partial x}\right)$  – псевдодиференціальні оператори із символами з простору нескінченно диференційованих функцій степеневого росту  $C_{-\infty}^{\infty}$ ;

$\mu(t)$  – функція обмеженої варіації.

Подіявши перетворенням Фур’є за просторовими змінними, отримали такі крайові задачі:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A(t,s)\tilde{u}(s,t) \\ \int_0^T B(t,s)\tilde{u}(s,t) d\mu(t) = \tilde{\varphi}(s) \end{cases} \quad (3)$$

і

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = A(t,s)\tilde{u}(s,t) + \tilde{f}(s,t) \\ \int_0^T B(t,s)\tilde{u}(s,t) d\mu(t) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де перетворення Фур’є  $\tilde{u}(s,t)$ ,  $\tilde{\varphi}(s)$  і  $\tilde{f}(s,t)$  належать простору узагальнених функцій  $S$  для будь-якого  $t \in [0, T]$ .

Розв’язок диференціального рівняння з крайової задачі (3) є таким:

$$\tilde{u}(s,t) = \left( \exp \int_0^t A(\tau,s) d\tau \right) \cdot \psi(s), \quad (5)$$

де  $\psi(s)$  – довільна функція.

Підставивши розв’язок (5) в інтегральну умову з крайової задачі (3), отримали:

$$\int_0^T B(t,s) \left( \exp \int_0^t A(\tau,s) d\tau \right) d\mu(t) \cdot \psi(s) = \tilde{\varphi}(s) \quad (6)$$

Можливість розв’язання рівняння (6) досягається лише за виконання умови:

$$\Delta(s) = \int_0^T B(t,s) \left( \exp \int_0^t A(\tau,s) d\tau \right) d\mu(t) \neq 0 \quad (7)$$

Для того, щоб розв’язок  $\tilde{u}(s,t)$  належав простору  $C^1([0, T], S)$ , необхідно і достатньо, щоб

функція  $Q(s,t) = \frac{\exp \int_0^t A(\tau,s) d\tau}{\Delta(s)}$  належала простору  $C_{-\infty}^{\infty}$ .

Отримали такий результат: задача (1) коректно вирішена з простору  $S$  у простір  $C^1([0, T], S)$ , якщо  $Q(s, t) \in C_{-\infty}^{\infty}$ . До того ж, якщо у задачі (3) існує функція  $Q(s, t)$ , то у задачі (4) існує функція Гріна:

$$G(s, t, \tau) = \begin{cases} \int_0^{\tau} B(\xi, s) Q(s, t - \tau + \xi) d\mu(\xi), & \tau \leq t \\ -\int_{\tau}^T B(\xi, s) Q(s, t - \tau + \xi) d\mu(\xi), & \tau > t. \end{cases} \quad (8)$$

Крім того, коректність задачі (3) зумовлює коректність задачі (4). Це дозволило дійти висновку, що для будь-якого рівняння із крайової задачі (1) із символом  $A(t, s) \in C_{-\infty}^{\infty}$  існує така функція  $B(t, s) \in C_{-\infty}^{\infty}$ , що задача (1) коректно вирішена з простору узагальнених функцій  $S$  у простір  $C^1([0, T], S)$ .

Розглянемо розрахункову математичну модель процесу лазерної дії на ембріон. Теплофізичні характеристики процесу задані з огляду на експертну оцінку параметрів випромінювачів, розподіл температурних полів розрахований за допомогою рівномірної сітки. Система диференціальних рівнянь теплопровідності:

$$\begin{cases} 5.46 \frac{\partial T_1}{\partial t} = 0.71 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + 55; \\ 5.44 \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0.96 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r_2} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + 94.1; \\ 5.1 \frac{\partial T_3}{\partial t} = 0.91 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{2}{r_3} \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + 452.4. \end{cases} \quad (9)$$

Граничні умови початку та кінця лазерної дії:

$$\begin{cases} T(0; 0) = 100 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ T(55; 2800) = 37 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (10)$$

Граничні умови питомого теплового потоку:

$$-0,67 \frac{\partial T_1}{\partial r}(0, t) = 4, 4. \quad (11)$$

Система диференціальних рівнянь із вказаної вище крайової задачі відповідає отриманим у цій роботі умовам коректності, а тому для розрахункової математичної моделі, яка описує ембріон під лазерною дією, існує єдиний розв'язок.

Наведемо кілька прикладів коректних крайових задач.

1. Розглянемо рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = (2t - T) \Delta u(x, t) + c(t)u(x, t) \quad (12)$$

Функція  $Q(s, t)$ :

$$Q(s, t) = \frac{\exp\left(\left(Tt - t^2\right)s^2 + \int_0^t c(\tau) d\tau\right)}{\int_0^T \exp\left(\left(Tt - t^2\right)s^2 + \int_0^t c(\tau) d\tau\right) dt} \quad (13)$$

Виконавши оцінку знаменника методом Лапласа, отримали:

$$Q(s, t) \underset{|s| \rightarrow +\infty}{\sim} \frac{|s|}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\int_{T/2}^t c(\tau) d\tau\right) \cdot \exp(-1) \left(t - \frac{T}{2}\right)^2 |s|^2 \quad (14)$$

Отже,  $Q(s, t) \in C_{-\infty}^{\infty}$  і задача буде коректно вирішеною з простору  $S$  у простір  $C^1([0, T], S)$ .

2. Розглянемо більш загальне рівняння:

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = a(t) \Delta u(x, t) + \sum_{k=1}^n b_k(t) \frac{\partial u(x, t)}{\partial x_k} + c(t)u(x, t) \quad (15)$$

де  $a(t)$ ,  $b_k(t)$ ,  $c(t)$  – дійсні неперервні функції на відрізьку  $[0, T]$ .

Використавши результати попередніх досліджень, отримали, що крайова задача диференціального рівняння (15) з умовою:

$$\int_0^T u(x_1 - B_1(t), \dots, x_n - B_n(t)) dt = \varphi(x) \quad (16)$$

де  $B_k(t) = \int_0^t b_k(\tau) d\tau$ ,  $1 \leq k \leq n$  буде коректно вирішеною з простору  $S$  у простір  $C^1([0, T], S)$ .

3. Розглянемо крайову задачу:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} \right), \\ u(x, t_k - 0) = u(x, t_k + 0), \\ u(x, 0) + \gamma u(x, T) = \varphi(x). \end{cases} \quad (17)$$

Подіємо перетворенням Фур'є за просторовими змінними:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{u}(s, t)}{\partial t} = ks^2 \tilde{u}(s, t), \\ \tilde{u}(s, t_k - 0) = \tilde{u}(s, t_k + 0), \\ \tilde{u}(s, 0) + \gamma \tilde{u}(s, T) = \tilde{\varphi}(s), \end{cases} \quad (18)$$

Функція  $Q(s, t)$  має такий вигляд:

$$Q(s,t) = \begin{cases} \exp\{(t-t_0)\tilde{A}_1(s)\}\Delta^{-1}(s); \\ \exp\{(t-t_1)\tilde{A}_2(s)\}\Delta^{-1}(s)\exp\{t_1\tilde{A}_1(s)\}; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \exp\{(t-t_{n-1})\tilde{A}_n(s)\}\Delta^{-1}(s)\exp\{t_1\tilde{A}_1(s)+\dots+(t_{n-1}-t_{n-2})\tilde{A}_{n-1}(s)\}. \end{cases} \quad (19)$$

З урахуванням, що  $\tilde{A}_k(s) = -ks^2$ , отримали:

$$Q(s,t) = \begin{cases} \exp(-ts^2)\Delta^{-1}(s); \\ \exp\left\{\left(t-\frac{T}{2}\right)(-2s^2)\right\}\Delta^{-1}(s)\exp\left(-\frac{Ts^2}{2}\right); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ \exp\left\{\left(t-\frac{(n-1)T}{n}\right)(-ns^2)\right\}\Delta^{-1}(s)\exp\left(-\frac{Ts^2(n-1)}{2}\right), \end{cases} \quad (20)$$

де  $\Delta^{-1}(s) = 1 + \gamma \exp\left\{-\frac{Ts^2(n+1)}{2}\right\}$ .

Тому при додатніх  $\gamma$  крайова задача коректна в просторі узагальнених функцій  $S$ , при від'ємних  $\gamma$  крайова задача не буде коректною.

4. Розглянемо крайову задачу:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \frac{1-m}{2m}T\Delta u(x,t), \text{ при } 0 \leq t \leq \frac{T}{2m}, \\ \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{2}T\Delta u(x,t), \text{ при } \frac{(2m-1)T}{2m} \leq t \leq T, \\ u\left(x, \frac{T}{2m} - 0\right) = u\left(x, \frac{T}{2m} + 0\right), \\ u\left(x, \frac{(2m-1)T}{2m} - 0\right) = u\left(x, \frac{(2m-1)T}{2m} + 0\right), \\ \sum_{k=0}^{2m} u\left(x, \frac{kT}{2m}\right) = \varphi(x). \end{cases} \quad (21)$$

Покажемо, що крайова задача (21) коректна у просторі узагальнених функцій  $S$ . Подівавши перетворенням Фур'є за просторовими змінними на крайову задачу (21), отримали:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = \frac{1-m}{2m}Ts^2\tilde{u}(s,t), \\ \frac{\partial \tilde{u}(s,t)}{\partial t} = \frac{1}{2}Ts^2\tilde{u}(s,t), \\ \tilde{u}\left(s, \frac{T}{2m} - 0\right) = \tilde{u}\left(s, \frac{T}{2m} + 0\right), \\ \tilde{u}\left(s, \frac{(2m-1)T}{2m} - 0\right) = \tilde{u}\left(s, \frac{(2m-1)T}{2m} + 0\right), \\ \sum_{k=0}^{2m} \tilde{u}\left(s, \frac{kT}{2m}\right) = \tilde{\varphi}(s). \end{cases} \quad (22)$$

Функція  $Q(s,t)$ :

$$Q(s,t) = \frac{\exp\left\{-\left(t-t_{k-1}\right)\frac{k-m}{2m}Ts^2\right\}}{\sum_{k=0}^{2m} \exp\left\{-\sum_{j=0}^k \left(t_{j+1}-t_j\right)\frac{j-m}{2m}Ts^2\right\}} \in C_{-\infty}^{\infty}. \quad (23)$$

Отже, розглянута крайова задача коректна в просторі узагальнених функцій  $S$ .

Авторами удосконалені результати публікації [10] в частині урахування специфіки технологічного процесу термічної дії при побудові крайових задач. При цьому зазначимо про результати публікації [11], де розроблено динамічну модель затримок у прийнятті рішень у логістичній системі та запропоновано критерій підвищення надійності функціонування логістичної системи вантажних перевезень і вантажних підприємств. Деякі питання оптимізації технологічних систем розглянуті в публікації [12].

Результати проведених досліджень можуть бути використані для обґрунтування коректності низки прикладних оптимізаційних математичних моделей для багатошарових технічних, механічних, біотехнологічних та інших систем. Це дозволить підвищити точність розрахунку та оптимізації параметрів багатошарових систем, які містять джерела термічної дії.

**Висновки.** У статті наведений один із можливих алгоритмів для отримання розв'язку нелокальної крайової задачі систем еволюційних параболічних диференціальних і псевдодиференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами та інтегральною умовою.

Авторами визначені і детально досліджені умови коректності крайової задачі у просторі узагальнених функцій, що дало можливість

гарантувати коректність крайових задач систем псевдодиференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами. Це дозволяє стверджувати про існування єдиного розв'язку багатьох розрахункових

математичних моделей, які описують стан технічних, біотехнологічних, механічних та інших багаточастотних систем. Результати дослідження продемонстровані на конкретних прикладах.

#### Список літератури:

1. Волевич Л.Р., Гиндикин С.Г. Обобщенные функции и уравнения в свертках. М. : Наука, 1994. 336 с.
2. Макаров А.А., Николенко И.Г. Частичная параболичность краевой задачи для псевдодифференциальных уравнений в слое. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Математика, прикладна математика і механіка*. Харків, 2019. Т. 89. С. 21–32. DOI: 10.26565/2221-5646-2019-89-03.
3. Пташник Б.Й., Ільків В.С., Кмить І.Я., Поліщук В.М. Нелокальні крайові задачі для рівнянь із частинними похідними. К. : Наукова думка, 2002. 416 с.
4. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. К. : Наукова думка, 1986. 268 с.
5. Скобло Т.С., Мартыненко А.Д., Бантковский В.А., Гончаренко А.А., Сайчук А.В., Тихонов А.В., Лысенко С.В. Использование лазерных технологий для упрочнения и восстановления изделий из сталей и сплавов. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. № 15. С. 142–162.
6. 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.
7. Smolyaninova Y.I., Shigimaga V.A., Kolesnikova A.A., Popivnenko L.I., Todrin A.F. Electric conductivity and resistance of mouse oocyte membranes to effect of pulsed electric field in cryoprotectant solutions. *Problems of Cryobiology and Cryomedicine*. 2018. Vol. 28, № 4. P. 311–321. <https://doi.org/10.15407/cryo28.04.311>.
8. Shakhova Yu.Yu., Paliy A.P., Paliy A.P., Shigimaga V.O., Kis V.M., Ivanov V.I. Use of multicomponent cryoprotective media during cryopreservation of murine embryos by vitrification. *Problems of Cryobiology and Cryomedicine*. 2020. Vol. 30, № 2. P. 203–206. <https://doi.org/10.15407/cryo30.02.203>.
9. Кутья О.В. Розробка динамічної моделі затримок прийняття рішень у логістичних ланцюгах міських вантажних перевезень. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. № 16. С. 37–47.
10. Levkina R., Levkin A., Petrenko A., Kolomiets N. Current approaches to biotechnology in animal husbandry. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020. Vol. 29, Issue 8 Special issue. Pp. 2463–2469.
11. Volkov V., Taran I., Volkova T., Pavlenko O., Berezhnaja N. Determining the efficient management system for a specialized transport enterprise. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2020. Vol. 4. P. 185–191. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/185>.
12. Skoblo T.S., Sidashenko O.I., Saichuk O.V., Klochko O.Y., Levkin D.A. Influence of Stresses on Structural Changes in Gray Cast Iron. *Materials Science*. 2020. Vol. 56, Issue 3. P. 347–358.

#### Levkin D.A., Berezhna N.G., Lukyanov I.M., Levkin A.V. MATHEMATICAL TOOLS FOR APPLIED PROBLEMS SOLVING

*Mathematical modeling of the thermal action problem on multilayer technical systems is performed in this article. The authors developed a computational mathematical model of the action process which is a non-local boundary value problem for a system of evolutionary pseudo-differential equations with an integral condition. One of the possible approaches for numerical realization of the considered boundary value problems is given.*

*A discrete model for estimating the state of multilayer technical systems that contain local, concentrated, discrete sources of temperature fields has been developed. In this case, the multilayer structure of the simulated systems and the specific features of the action process are taken into account. The technical characteristics of radiators are set proceeding from the preliminary expert estimation of parameters of the systems.*

*Having studied the boundary value problems, the authors obtained and substantiated the conditions for the correctness of parabolic boundary value problems for systems of evolutionary differential and pseudodifferential equations with the constant coefficients in the polyslayer. In this case, the results of the article can be used without significant changes to justify the correctness of boundary value problems for systems of pseudo-differential equations with variable coefficients. The application of the conditions specified in this article will guarantee the existence and the uniqueness of differential equations solutions from boundary value problems that simulate the state of many technical, biotechnological, mechanical and other systems under the action of load sources.*



*The application of the conditions specified in this article will guarantee the existence and the uniqueness of differential equations solutions from boundary value problems that simulate the state of many technical, biotechnological, mechanical and other systems under the action of load sources. As an example of the wide use of the results of this work, the authors argue about the correctness of the calculated and applied optimization mathematical models of the bio-technological process of laser action on the embryo. The article gives examples of several correct boundary value problems for systems of differential equations. The research results can be used to improve the quality of automation of the modeling process and optimization of multilayer systems.*

**Key words:** *mathematical model, boundary value problem, pseudodifferential equations, correctness, optimization.*

**Максимов М.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

**Максимова О.Б.**

Інститут військово-морських сил

Національного університету «Одеська морська академія»

**Мінчев Д.С.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

У роботі досліджуються методи та моделі пошуку рішення за встановленим критерієм для управління системою теплопостачання міських районів за рахунок цільової зміни структури об'єкта управління. По-перше, була сформульована задача оптимізації для управління системою теплопостачання міських районів, по-друге, розроблено вирішальне правило щодо зміни структури за ціною енергетичних потоків і, по-третє, розроблено методи функціонування системи управління.

У роботі показано, що система управління теплопостачанням для кожного споживача, заснована на прийнятих критеріях якості, формує локальні цільові функції. Це дає змогу вибирати таку структуру об'єкта управління, за якої буде виконуватися умова  $f_j(w_{ij}(\tau)) \rightarrow \min$ .

Критеріями цільової функції вибрані: вартість ресурсів, ефективність обладнання і його надійність. Багатокритеріальна задача оптимізації зведена до однокритеріальної за рахунок приведення складників до грошових одиниць. Оптимізація полягає в пошуку найдешевшого джерела або групи джерел.

Дослідження показали, що цільову функцію можна представити у вигляді суми двох складових частин: адитивної, що залежить тільки від часу, і мультиплікативної. Адитивна частина цільової функції є сумою всіх витрат, що не залежать від потужності джерела. Вона складається з капітальних витрат на спорудження. Мультиплікативна частина цільової функції включає витрати на компенсацію теплових і фізичних втрат у теплових мережах і компенсацію зміни надійності  $R(t, \Delta t)$ .

У роботі наведений алгоритм пошуку найкращої структури технічних засобів об'єкта управління, який покладено в основу методу управління структурою складної системи теплопостачання, без обмежень на ресурси.

Для управління структурою системи теплопостачання в умовах обмежень на ресурси і збурень розвинуто метод, який полягає в тому, що рішення задачі управління теплопостачанням на кожному кроці моделювання забезпечується безліччю джерел теплової енергії, які, в свою чергу, забезпечують мінімальне значення цільової функції, що дозволило отримати високу ефективність.

**Ключові слова:** цільова функція, рішення задачі оптимізації, алгоритм пошуку структури, рішення задачі управління, міський район.

**Постановка проблеми.** У сучасному великому місті України з переходом на ринкові ціни на енергоносії росте рівень вимог до функціональних характеристик комп'ютерно-інтегрованих систем управління, які забезпечують управління технічними засобами теплопостачання [1, с. 13; 2, с. 51].

Сучасні технології комп'ютерного управління роблять можливим підключення технічних засобів теплопостачання з тих, які працюють у системі, з мінімальними поточними витратами фінансових ресурсів за зміни середовища їх використання з

відсутністю або мінімізацією втручання оператора під час функціонування.

Сьогодні рівень розвитку теорії адаптивних систем і методів управління, а також теорії оптимального управління дають змогу вирішити завдання управління структурою взаємозамінного обладнання системи теплопостачання, яке забезпечить пошук мінімальних витрат ресурсів. При цьому апріорно розуміється, що кожна одиниця устаткування, яка управляється з параметрами, працює в оптимальному режимі [2, с. 55; 3, с. 100; 4 с. 146].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

В останні десятиліття активно розвиваються системи з цілеспрямовано змінною структурою у сфері промисловості і теплоенергетики. Слід зазначити низку робіт з управління структурою об'єкта. У [5, с. 151] пропонується комплекс методів для управління об'єктами із цілеспрямовано змінною структурою на прикладі гірничо-збагачувальної фабрики. У роботі [6, с. 112] пропонується моделі і методи комплексного управління технологічними процесами поточних виробництв на прикладі нафтопереробного заводу.

Головна перевага згаданих робіт у тому, що в них розроблені методи і моделі, які дозволяють шляхом зміни структури об'єкта управління забезпечити безперервність технологічного процесу і, як наслідок, підтримати технологічні параметри процесу на заданому рівні.

У роботі [7, с. 212] розглянуто керування процесом теплопостачання окремого котеджу з використанням альтернативних джерел теплової енергії.

У роботі [8, с. 182] наведено рішення задачі оптимізації процесу теплопостачання окремого котеджу. Обґрунтовано необхідність комплексного оцінювання стану системи теплопостачання за чотирма критеріями: якість забезпечення заданої температури, вартість витрачених ресурсів, ефективність і надійність використовуваного обладнання. Для вирішення завдання були використані методи цільового програмування та генетичні алгоритми.

Основна складність під час управління структурою об'єкта управління полягає в тому, що зовнішні впливові фактори, як правило, носять імовірнісний характер. Як показали дослідження в [2, с. 58], можна спробувати змоделювати вірогідну природу шуканих параметрів системи і спланувати роботу обладнання. На жаль, методи вирішення задач прогнозування досить складні з обчислювального погляду. Ця складність зростає зі збільшенням інтервалу прогнозування та кількості одиниць обладнання, що використовується.

**Постановка завдання.** Метою статті є синтез та обґрунтування методів і моделей пошуку найкращого рішення для управління системою теплопостачання міста за рахунок цільової зміни структури об'єкта управління.

Досягнення мети здійснюється розробленням таких завдань:

- постановка задачі оптимізації для управління системою теплопостачання міста за рахунок цільової зміни структури об'єкта;

- визначення вирішального правила щодо зміни структури ціни на енергетичні потоки;

- розроблення методів функціонування системи управління теплопостачання міста.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Розглянемо задачу оптимізації для управління системою теплопостачання міста за рахунок цільової зміни структури об'єкта. Кожен споживач може отримувати теплову енергію від більш ніж одного джерела. Джерела, що підключені до споживача, можуть функціонувати одночасно. Факт підключення  $i$ -го джерела до  $j$ -го споживача визначається наявністю зв'язку  $w_{ij} = 1$  (рис. 1). При відключенні джерела відповідний зв'язок  $w_{ij}$  приймає значення 0.

У довільний момент часу кожен споживач може підключитися до будь-якого джерела або їх комбінації. Також кожен споживач на свій розсуд може змінювати задані значення температури, що підтримується в приміщеннях [3, с. 99; 4, с. 136].

Приймемо, що структурна оптимізація системи теплопостачання споживача буде мати на меті мінімізацію цільової функції. Тоді завдання оптимізації можна сформулювати таким чином: у кожен момент часу  $\tau$  вибирати такі функції  $w_{ij}(\tau)$ , що:

$$f_j(w_{ij}(\tau)) \rightarrow \min, \text{ при } K_{jk}(\tau) \leq K_{jkmax}.$$

Умова  $K_{jk}(\tau) \leq K_{jkmax}$  означає, що неможна нескінченно покращувати один критерій за рахунок погіршення іншого. Кожен критерій має максимальне допустиме значення. Позначивши вартісну складову цільової функції через  $S(\tau)$  та надійності з  $R(\tau)$ , отримаємо цільову функцію для вирішення задачі оптимізації:

$$f_j(w_{ij}(\tau)) = S(\tau) + R(\tau) \rightarrow \min$$

Всі складові частини виражені в грошових одиницях, отже, пошук оптимального рішення зводиться до вибору в кожен момент часу найдешевшого джерела теплової енергії (див. рис. 1). У разі, якщо його недостатньо для забезпечення заданої температури, з решти вибирається наступне джерело з мінімальною вартістю енергії, що генерується [9, с. 456, 10, с. 232].

Розрахунок вартісного складника  $S(\tau)$  цільової функції здійснювався за виразом:

$$S(\tau) = \frac{(C_e + C_{ia} + C_s)\Delta\tau}{N_c T} + \frac{C \Delta\tau}{N_c T_{om}} + C_r^i(\tau, G_c^i) \frac{3600000}{R_i \eta_i} + \Delta S$$

$$\Delta S = \frac{\sum_j C_r^j(\tau, G_c^j) G_r^j \Delta\tau}{N_c}$$

де  $R_i$  – питома енергоємність  $i$ -го енергоресурсу, для палива це питома теплота згоряння, для електрики  $R_i = 1$ ;

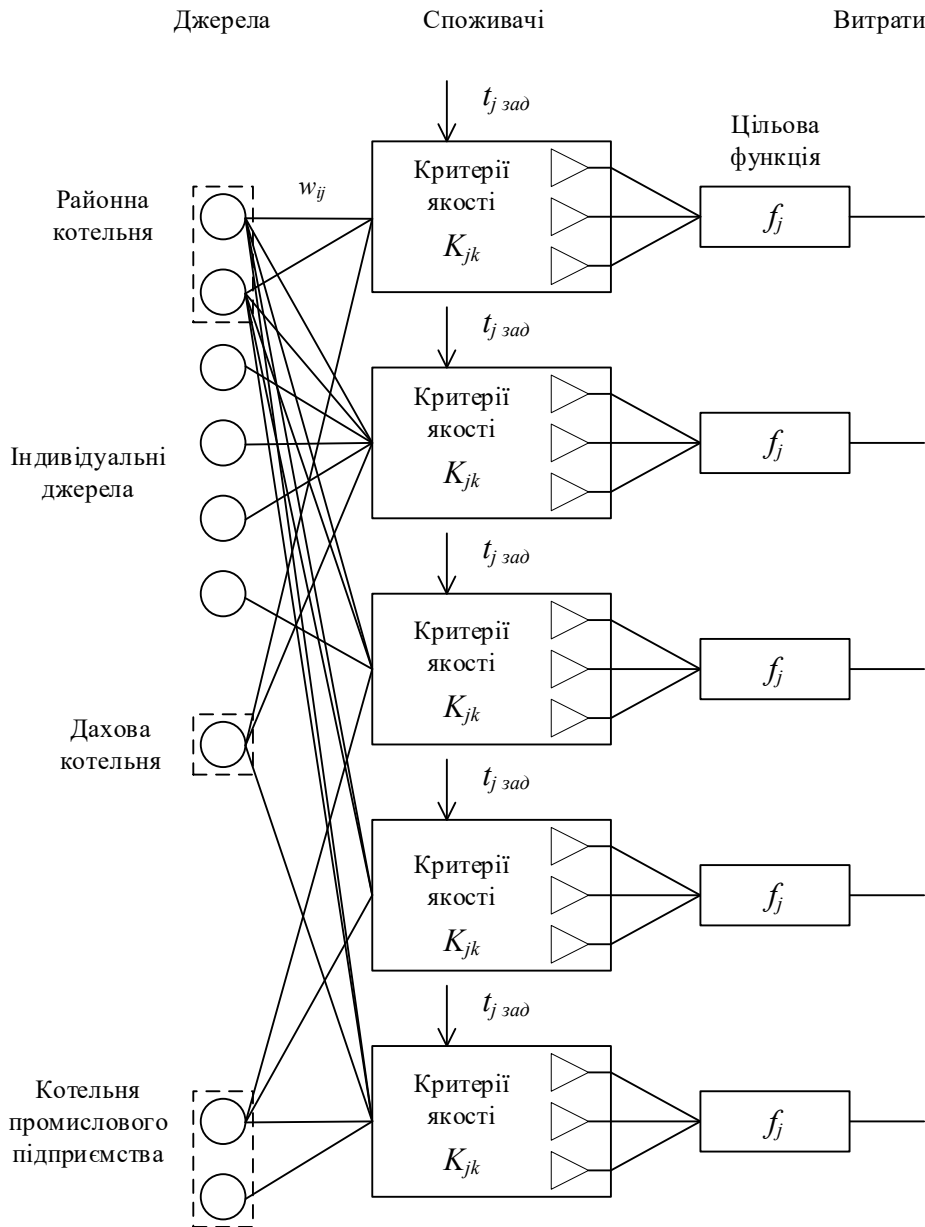


Рис. 1. Приклад структури розподіленої системи тепlopостачання міського району

$\Delta S$  – вартість додаткових витрат ресурсів для забезпечення процесу і компенсації втрат, грн;  $T$  – ресурс системи, с;  $\Delta t$  – інтервал моделювання або інтервал, на якому оцінюється робота системи, с;  $C_e$  – вартість обладнання, грн;  $C_{ia}$  – вартість монтажу та наладки, грн;  $C_s$  – вартість обслуговування системи за період часу  $T$ , грн;  $C$  – інші витрати за період  $T_{om}$ , грн;  $G_c^i$  – кількість вже спожитого  $i$ -го ресурсу за звітний період  $T_{om}$  (місяць), в залежності від типу джерела може змінюватися в кг, м<sup>3</sup>, кВтгод;  $C_r^i(\tau, G_c^i)$  – поточна ціна  $i$ -го ресурсу, що залежить як від часу доби, так і від кількості вже спожитого енергоресурсу, залежно від типу джерела може вимірюватися грн/кг, грн/Дж, грн/кВтгод, грн/м<sup>3</sup>;  $G_r^i$  – поточна витрата  $i$ -го

ресурсу за звітний період  $T_{om}$  (місяць);  $N_c$  – кількість підключених споживачів;  $N_{\Sigma}^{nomp}$  – сумарна потужність теплових втрат споживачів, Вт;  $N_{\Sigma}^{ucm}$  – сумарна потужність теплогенеруючого обладнання.

Для вираження в грошовому еквіваленті характеристики надійності були використані методи з розрахунку тарифних ставок масових ризикових видів страхування [9; 10; 11; 12].

$$T_0 = p \frac{\bar{Q}}{S_n} = (1 - P(\tau)) \frac{\bar{Q}}{S_n} \quad (1)$$

$$T_p = 1.2 T_0 \alpha(\gamma) \sqrt{\frac{1-p}{np}} = 1.2 T_0 \alpha(\gamma) \sqrt{\frac{P(\tau)}{n(1-P(\tau))}} \quad (2)$$

де:  $\alpha(\gamma)$  – коефіцієнт, що залежить від гарантії безпеки  $\gamma$ ;  $\bar{S}_n$  – середня страхова сума за одним договором;  $\bar{Q}$  – середнє відшкодування за одним договором страхування;  $N$  – загальна кількість договорів, укладених за деякий період часу в минулому;  $M$  – кількість страхових випадків у  $N$  договорах;  $p$  – ймовірність настання страхового випадку за одним договором  $p = \frac{M}{N}$ ;  $n$  – кількість договорів страхування, віднесених до періоду часу, на який проводиться страхування.

Якщо статистики за величинами  $p$ ,  $\bar{S}_n$ ,  $\bar{Q}$  відсутні, то їх можна оцінювати експертним методом або замінювати значеннями показників аналогів. Так, ймовірність  $p$  настання страхового випадку в нашому разі можна замінити величиною, зворотною до надійності джерела теплової енергії  $p = 1 - P(\tau)$ . Середню страхову суму за одним договором  $\bar{S}_n$  орієнтовно можна прийняти рівною капітальним витратам на придбання монтажу і налагодження, віднесеним до кількості споживачів:

$$\bar{S}_n = \frac{C_e + C_{ia}}{n} \quad (3)$$

Слід також враховувати, що кількість договорів страхування не завжди визначається кількістю підключених споживачів  $N_c$ . Для випадку з котельнею таке припущення є правомірним, оскільки в разі аварії котельні компенсації повинні бути виплачені всім абонентам. Для індивідуальних джерел тепла рекомендується розглядати обмежену сукупність абонентів, наприклад будинків.

Необхідна грошова оцінка надійності може бути отримана на основі величини Нетто-ставки  $T_n$ .

$$T_n = T_0 + T_p \quad (4)$$

де:  $T_0$  – основна частина Нетто ставки;  $T_p$  – ризикова надбавка.

Значення Нетто-ставки, яке отримується по (4), є часткою страхової суми. Як останню доцільно брати сумарні капітальні витрати на монтаж і налагодження джерела теплової енергії.

Згідно з діючими методиками розрахунків тарифних ставок, нижня межа співвідношення величин  $\bar{Q}$  та  $\bar{S}_n$  в (5) приймається в діапазоні від 0,3 для медичного страхування до 0,7 для страхування відповідальності [10]. Було прийнято співвідношення цих величин рівним 0,7.

У загальному випадку складник надійності з урахуванням (1)–(4) визначається виразом:

$$R(\tau) = \left[ (1 - P(\tau)) 0,7 \left( 1 + 1,2\alpha(\gamma) \sqrt{\frac{P(\tau)}{n(1 - P(\tau))}} \right) \right] \times \frac{(C_e + C_{ia})\Delta\tau}{\Delta T} \quad (5)$$

Ймовірність безвідмовної роботи обладнання  $P(\tau)$  пропонується розраховувати за методикою, викладеною в [13, с. 346], згідно з якою надійність обладнання визначається двома видами відмов: випадковими та зносним, залежить від стану навколишнього середовища і відносної потужності, на якій функціонує обладнання.

Визначимо вирішальне правило щодо зміни структури ціни на енергетичні потоки.

Основні труднощі в розглянутій задачі оптимізації полягають у тому, що управління процесом теплопостачання здійснюється тільки на підставі непрямих впливів і вимірювань, а також характеризується суттєвою інерційністю. Зміна ціни на той чи інший енергетичний потік може дати ефект через годину або навіть добу. Тому головна вимога до вирішення завдання оптимізації полягає в тому, що період керуючих сигналів повинен бути досить великим, щоб можна було оцінити ефект від їх впливу. Визначення величини цього періоду виходить за рамки цієї роботи і має скоріше соціальний характер.

Задача оптимізації була сформульована таким чином: в умовах обмеженості доступних енергетичних потоків необхідно забезпечити таку структуру енергоспоживання, яка забезпечить процес теплопостачання міста протягом максимально можливого часу.

Єдиним доступним аргументом для управління процесом теплоспоживання в масштабах міста є ціна на енергоресурси. Збільшення або зменшення ціни на газ і електроенергію призведе до зміни собівартості теплової енергії та, у свою чергу, до зміни структури локальних систем теплопостачання кожного споживача.

Рівномірне підвищення цін на всі енергоресурси загалом призведе до подорожчання теплової енергії і, як наслідок, до потенційного зниження заданої температури у низки споживачів. Це дозволить знизити витрату енергоресурсів за рахунок вимушеного зниження споживачами якості теплопостачання.

З іншого боку, зміна співвідношення цін на газ і електроенергію дасть змогу змінювати структуру енергоспоживання за збереження сумарних надходжень до бюджету.

Основним критерієм під час вирішення задачі оптимізації слід прийняти час функціонування  $\tau_{\text{функ}}$  міських систем теплопостачання при поточній витраті енергоресурсів  $G_i$  та їх доступному ліміті  $M_i$ .

$$\tau_{\text{функ}} = f(G_1, G_2, \dots, M_1, M_2, \dots)$$

Очевидним є те, що при  $M_i = \text{const}$  функція  $\tau_{\text{функ}} = f(G_1, G_2, \dots, M_1, M_2, \dots)$  не має оптимуму і лінійно зростає зі зменшенням витрат  $G_i$ , а після використання доступної кількості енергоресурсів система перестає існувати.

Якщо ж прийняти, що доступна кількість енергоресурсів постійно оновлюється з деяким періодом  $\tau_M$ , то глобальна оптимізація буде досягнена у разі виконання умови:

$$M_i^{\text{ocm}} - G_i(t_m - t) - M_i^{\text{нз}} \leq \delta_i, \quad (6)$$

де  $M_i^{\text{ocm}}$  – залишок  $i$ -го енергоресурсу;  $M_i^{\text{нз}}$  – недоторканий запас  $i$ -го енергоресурсу;  $\delta_i$  – припустима похибка визначення кількості  $i$ -го енергоресурсу.

При цьому слід зазначити, що величина  $G_i = f(C_r^i)$  має вірогідний характер та не піддається точному визначенню.

Таким чином, оптимізація полягає в підтримці балансу між залишками ресурсів  $M_i^{\text{ocm}}$  та швидкістю їх споживання  $G_i$  шляхом впливу на ціни енергоресурсів  $C_r^i$ .

Розглянемо алгоритми функціонування системи управління теплопостачання міста. Задача оптимізації полягає у виборі в кожен момент часу  $\tau$  таких зв'язків  $w_{ij}(\tau)$  між джерелами і споживачами, тобто в організації такої структури системи теплопостачання, яка забезпечить мінімум цільової функції  $f_j$  для кожного споживача:

$$f_j(w_{ij}(\tau)) \rightarrow \min, \text{ при } K_{jk}(\tau) \leq K_{jk\text{max}}.$$

Задача глобальної оптимізації може бути досягнута при дотриманні балансу між залишковою кількістю ресурсів  $M_i^{\text{ocm}}$  та швидкістю їх витрати  $G_i$  (6).

На практиці реалізація системи управління може вимагати синтез досить складної системи правил і умов. Тому необхідно остаточно формалізувати алгоритми системи управління.

При локальній оптимізації в загальному випадку можливо два підходи. Умовно вони визначаються такими двома правилами:

– у кожен момент часу теплопостачання споживача може здійснюватися тільки від одного джерела теплової енергії;

– у кожен момент часу теплопостачання споживача може здійснюватися тільки від безлічі джерел теплової енергії.

**Перший варіант** на практиці потребує, щоб кожне альтернативне джерело мало можливість повністю забезпечити споживача теплом. Другий підхід такого обмеження не має і є більш універсальним. З іншого боку, другий підхід вимагає внесення в алгоритм управління певних обмежень. Так, наприклад, якщо джерело з меншою вартістю теплової енергії працює не на повну потужність, тоді немає сенсу паралельно підключати ще одне.

У загальному вигляді алгоритм управління системою теплопостачання для вирішення завдання локальної оптимізації наведений на рис. 2.

Слід зазначити, що при дефіциті якого-небудь одного ресурсу відбудеться збільшення вартості цього ресурсу  $i$ , в рамках виконання завдання локальної оптимізації, перерозподілиться використання доступних ресурсів автоматично. У цьому разі втручання споживача не потрібно, а зміна структури ціни безпосередньо впливає на швидкість споживання розглянутого ресурсу.

У разі, коли дефіцит поширюється на всі ресурси, потенційно можливо два рішення задачі глобальної оптимізації. Перше має на увазі можливість системи управління безпосередньо змінювати задану температуру в приміщеннях споживачів. Поява дефіциту всіх ресурсів призведе до автоматичного зниження підтримуваної температури, тобто до зниження якості забезпечення заданої температури у споживачів, що безпосередньо спричинить зменшення швидкості витрати ресурсів  $G_i$  за рахунок зменшення теплових втрат.

На рис. 3 наведений алгоритм управління, що передбачає можливість керування температурою споживачів. Алгоритм являє собою нескінченну послідовність циклів управління. Враховуючи, що протягом доби потреба в тепловій енергії істотно змінюється, один цикл управління повинен тривати досить довго для того, щоб отримати усереднене значення швидкості споживання ресурсів.

Кожен цикл починається з оцінки залишкової кількості ресурсів на момент часу  $t_m$ , коли планується надходження нових запасів ресурсів:

$$D_i = M_i^{\text{ocm}} - G_i(t_m - t) - M_i^{\text{нз}}$$

Якщо всі залишки від'ємні, тобто спостерігається дефіцит усіх ресурсів, зменшується задана

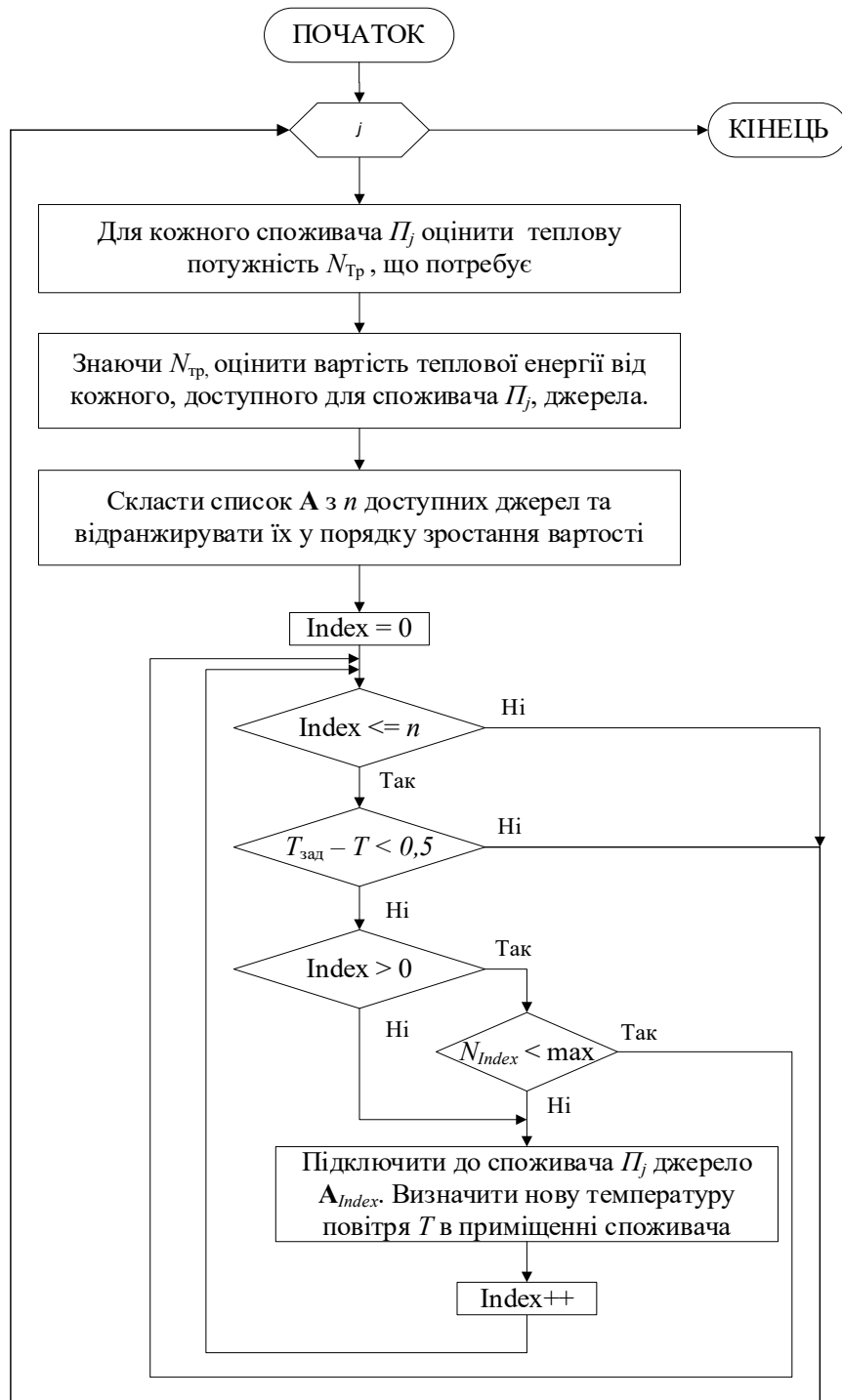


Рис. 2. Узагальнений алгоритм управління для задачі локальної оптимізації

температура споживачів і далі застосовується алгоритм локальної оптимізації (рис. 2).

Якщо всі залишки додатні, то вартість ресурсів по можливості зменшується до номінального значення, а підтримувана температура відповідно збільшується до номіналу.

**Другий варіант** управління заснований на припущенні про те, що система управління не

може безпосередньо впливати на задані температури у споживачів. У цьому разі автоматизація управління в задачі глобальної оптимізації може бути виконана лише до певної міри. Чіткої залежності  $G_i = f(C_r^i)$  між вартістю ресурсів і швидкістю їх споживання не існує. Це випадкова величина, повністю залежна від людського фактору. Можна лише сподіватися, що з підвищенням

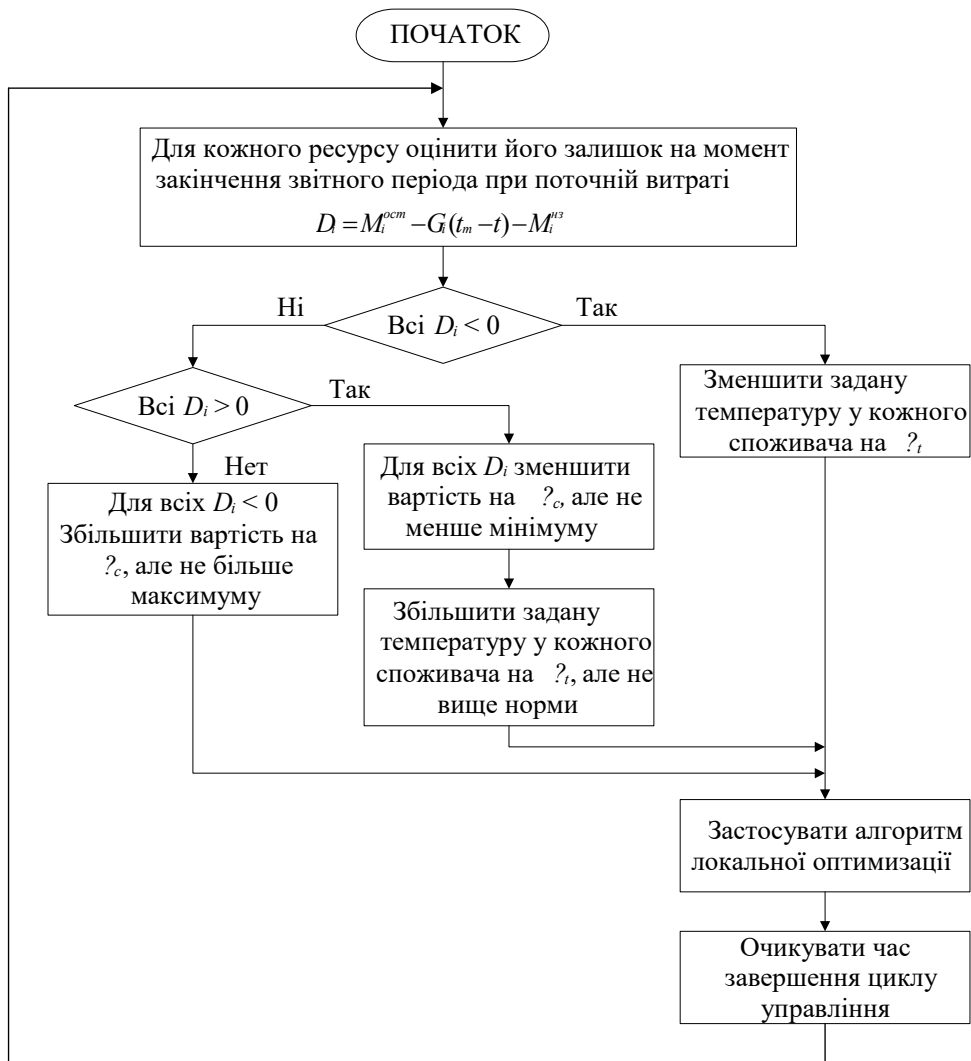


Рис. 3. Алгоритм управління для випадку зміни заданої температури споживачів

вартості того чи іншого ресурсу споживачі будуть обмежувати його використання. Відповідний алгоритм представлений на рис. 4.

Слід окремо зазначити граничні значення цін і температур. Зрозуміло, що нескінченно збільшувати або зменшувати ці величини не можна. З іншого боку, визначення їх конкретних значень виходить за межі цього дослідження, оскільки це питання скоріше зі сфери соціології і політики. На рис. 5 наведена узагальнена структурна схема системи управління тепlopостачанням міста.

Розглянемо роботу системи з погляду розроблених раніше алгоритмів управління. Під час вирішення локального завдання оптимізації один цикл управління полягає в такому. До блоку аналізу ціни надходить інформація від приладів обліку джерел і споживачів, а також дані моделі ОУ.

Сформовані для кожного споживача списки джерел теплової енергії, відсортовані в порядку зростання ціни, передаються до блоку управління структурою, який безпосередньо здійснює комутацію відповідних джерел і формує поточну структуру системи тепlopостачання. Значення заданих температур повітря і поточних витрат гарячої води від споживачів надходять до блоку аналізу необхідної потужності  $N_{\text{треб}}$ . Після аналізу поточної потреби кожного споживача в тепловій енергії визначаються необхідні потужності всіх джерел, що підключаються в даний момент часу, і через відповідний блок управління  $N_{\text{треб}}$  керуючі впливи надходять на конкретні джерела.

Функціонуючі в даний момент часу джерела вимагають певних витрат газу і електроенергії, облік яких здійснюється у відповідних приладах обліку джерел. Кількість енергоресурсів, яка



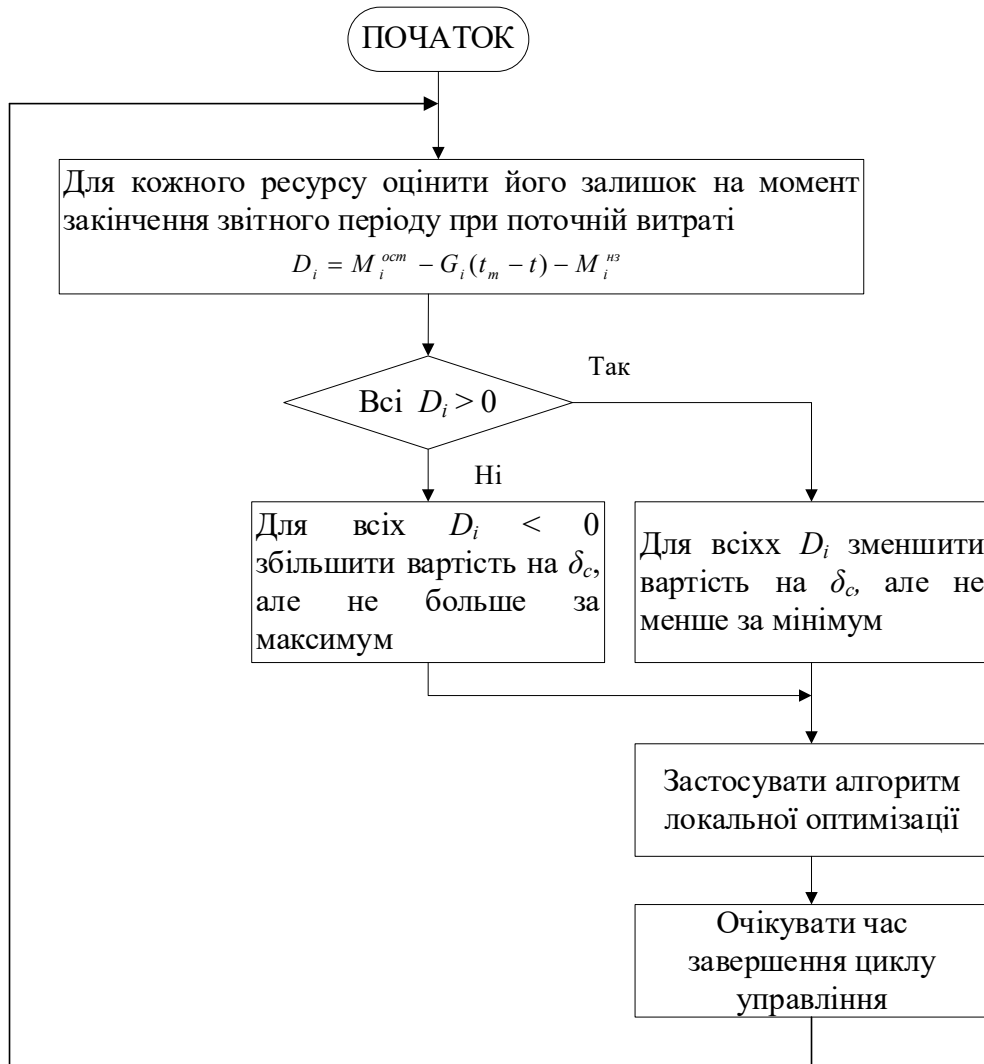


Рис. 4. Алгоритм управління для випадку, коли зміни заданої температури споживачів неможливі

споживаються в даний момент часу, а також вже спожитих, впливає на вартість теплової енергії на наступному циклі управління. На цьому один цикл управління завершується.

**Висновки.** Критеріями цільової функції були вибрані: вартість ресурсів, ефективність обладнання і його надійність. Багатокритеріальна задача оптимізації була зведена до однокритеріальної за рахунок приведення складників цільової функції до грошових одиниць. Таким чином рішення задачі оптимізації звелось до пошуку групи джерел, що забезпечують мінімальну структуру ціни.

Дослідження показали, що цільову функцію можна представити у вигляді суми двох складових частин: адитивної, що залежить тільки від часу, і мультиплікативної. Адитивна частина цільової функції є сумою всіх витрат, що не залежать від потужності джерела. Вона складається

з капітальних витрат на спорудження. Мультиплікативна частина цільової функції включає витрати на компенсацію теплових і фізичних витрат в теплових мережах  $\Delta S$  і компенсацію зміни надійності  $R(t, \Delta t)$ .

Представлений алгоритм пошуку найкращої структури технічних засобів об'єкта управління, який покладено в основу методу управління структурою складної системи теплопостачання, без обмежень на ресурси.

Для управління структурою системи теплопостачання в умовах обмежень на ресурси і збудень розвинуто метод, який полягає в тому, що рішення задачі управління теплопостачанням на кожному кроці моделювання забезпечується множиною джерел теплової енергії, які, в свою чергу, забезпечують мінімальне значення цільової функції, що дозволило отримати високу ефективність.

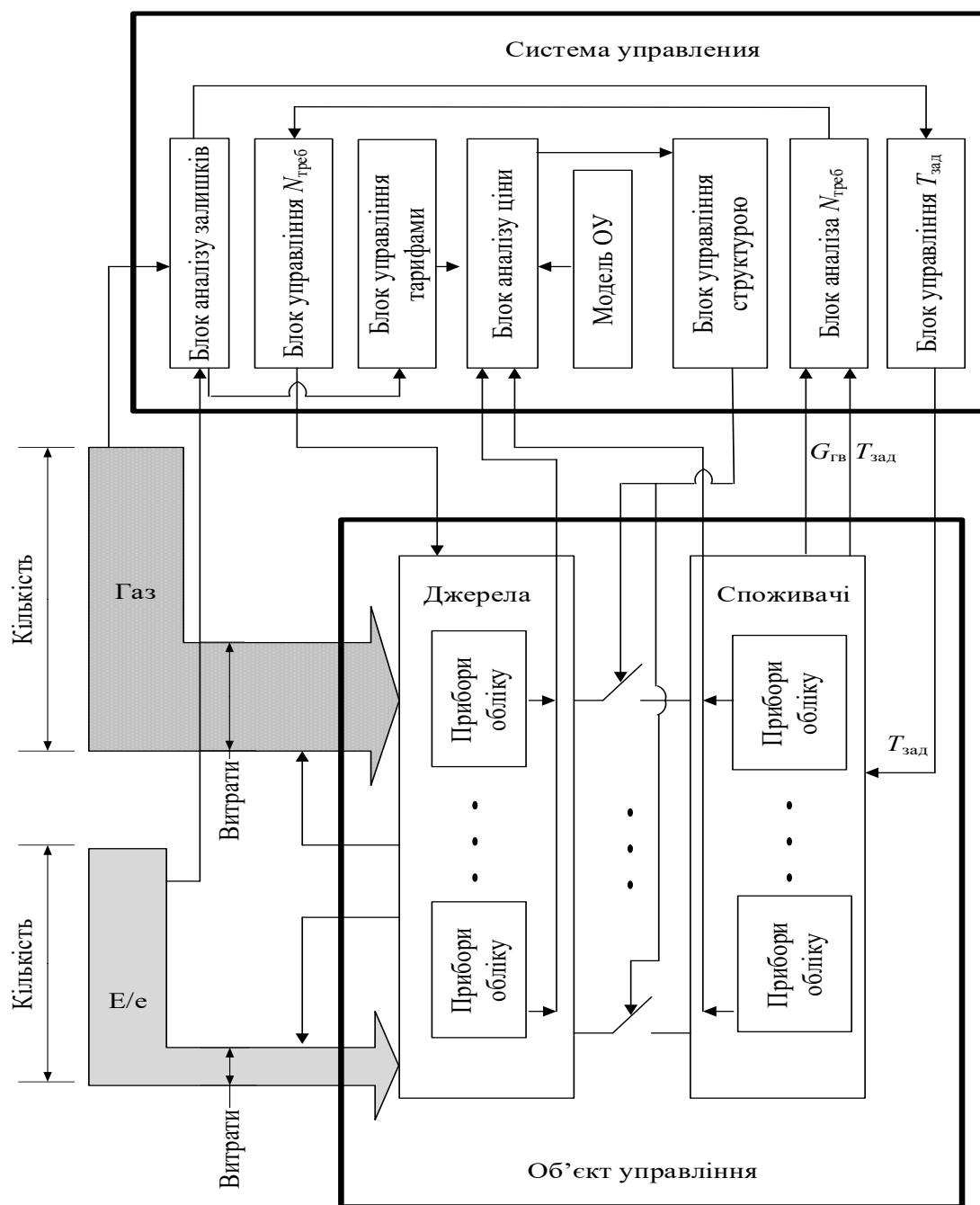


Рис. 5. Структурна схема системи автоматизованого управління тепlopостачанням міста

#### Список літератури:

1. Казаков И.Е., Артемьев В.М. Оптимизация динамических систем случайной структуры. М.: Наука, 1980. 384 с.
2. Максимова О.Б., Давыдов, В.О., Бабич С.В. Управление системой теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств. *Проблемы управления и информатики: междунар. науч.-техн. журн.* 2014. № 3. С. 50–60.
3. Максимова О.Б., Давыдов В.О. Метод управления структурой технических средств системы теплоснабжения. *Современные технологии управления: в 2 кн.: монография / под. общ. ред. С. В. Куприенко; SWorld, 2012. [Кн 1]. С. 95 – 108.*
4. Babich S.V., Davydov V.O. Objective function for municipal heat supply system's structural optimization. *Пр. Одес. нац. політехн. ун-ту.* Одеса, 2015. Вып. 1 (45). С. 134 – 140.

5. Mockler, R.J. Situational Theory of Management. *Harvard Business Review*. 1971. Vol. 49, No 3. P. 151.
6. Глумов В.М., Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами: некоторые результаты и направления развития. *Автоматика и телемеханика*. 1999. № 6. С. 100–116.
7. Поспелов, Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 288 с.
8. Щекин, Р.В., Березовский В.А., Потапов В.А. Расчет систем центрального отопления. К.: Вища школа, 1975. 215 с.
9. Страхование: учебник / Под ред. Т.А. Федоровой. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Экономистъ, 2004. 875 с.
10. Щербаков В.А., Костяева Е.В. Страхование: учеб. Пособие. М.: КНОРУС, 2007. 312 с.
11. Сплетухов В.А., Дюжиков Е.Ф. Страхование: учеб. Пособие. М.: ИНФА-М, 2006. 312 с.
12. Актуарная математика. Перев. с англ. / Н. Бауэрс, Х. Гербе, Д. Джонс и др.; под. ред Малиновского. М.: Янус-К, 2001. 656 с.
13. Гнеденко Б.В., Беляев Ю. К, Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. М. : Наука, 1965. 524 с.

**Maksymov M.V., Maksymova O.B., Minchev D.S. METHODS AND MODELS OF CONTROL SYSTEM WITH VARIABLE STRUCTURE OF HEAT SUPPLY OBJECTS**

*The paper investigates the methods and models of finding a solution according to the established criteria for the management of the district heating system due to the targeted change in the structure of the control object. First, the optimization problem for the management of the district heating system was formulated, secondly, a decisive rule was developed to change the structure at the price of energy flows and, thirdly, the methods of functioning of the control system were developed.*

*The paper shows that the heat supply management system for each consumer based on the accepted quality criteria forms local target functions. This allows you to choose the structure of the control object, which will fulfil the condition.*

*The criteria of the target function are: resource cost, equipment efficiency and reliability. The multi-criteria optimization problem is reduced to a single-criteria one, by reducing the components to monetary units. Optimization is about finding the cheapest source or group of sources.*

*Studies have shown that the objective function can be represented as the sum of two components: additive, which depends only on time, and multiplicative. The additive part of the objective function is the sum of all costs that do not depend on the power of the source. It consists of capital construction costs. The multiplicative part of the objective function includes the cost of compensation for heat and physical losses in heating networks and compensation for changes in reliability*

*The paper presents an algorithm for finding the best structure of technical means of the control object, which is the basis of the method of controlling the structure of a complex heat supply system, without restrictions on resources.*

*To control the structure of the heat supply system in terms of resource constraints and perturbations, a method has been developed, which is that the solution of the heat supply control problem at each step of the simulation is provided by many heat sources, which, in turn, provide a minimum value of the objective function high efficiency.*

**Key words:** target function, solution of optimization problem, structure search algorithm, solution of control problem, city district.

**Маринич І.А.**

Криворізький національний університет

**Сердюк О.Ю.**

Криворізький національний університет

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ КРИСТАЛІЗАЦІЇ МЕТАЛУ НА МАШИНІ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

*У статті розглядається розробка математичної моделі, яка враховує нерівномірність розподілу температури у заготівлі під час процесу розливання для завчасного прогнозу і формування керуючих впливів з метою недопущення теплових напруг, що можуть призвести до виникнення тріщини і прориву рідкої сталі у неперервно литому злитку. Практична значимість полягає у застосуванні отриманої математичної моделі при побудові адаптивної системи автоматичного керування, що дозволить досягти зменшення кількості браку та зниження часу аварійних простоїв обладнання через прориви рідкої сталі.*

*Безперервнолиті заготовки є основною сировиною для виробництва прокату, і якість заготовок визначає якість готового металовиробу. Однією з основних проблем, що зустрічається при розливанні металу на машині безперервного лиття заготовок радіально-криволінійного типу, є наявність тріщин і ліквіаційних зон у внутрішній структурі металу, а також на поверхні заготівлі. Однією з причин появи дефектів у безперервнолитих заготовках є термічні напруги. Зменшення термічних напруг забезпечується за допомогою підвищення якості управління в АСУ ТП за рахунок введення оптимального управління охолодженням заготовок.*

*Завдання підвищення якості заготовок вирішується оптимізацією процесу їх охолодження за рахунок застосування адаптивної системи автоматичного керування температурним полем заготовок машини безперервного лиття заготовок, яка використовує розроблену математичну модель процесу охолодження заготовок, що відрізняється від відомих тим, що дозволяє розраховувати температурне поле по всьому об'єму заготівлі в часі при змінній швидкості лиття заготівлі та з урахуванням теплоти кристалізації, структурних переходів сталі, тепловіддачі за рахунок водяного охолодження.*

**Ключові слова:** автоматизація, машина безперервного лиття заготовок, математична модель, кристалізатор, безперервнолита заготовка, температурне поле.

**Постановка проблеми.** Процес розливання розплавленої сталі є важливим складником металургійного циклу. Цей процес може здійснюватися як дискретно, при розливанні у виливниці, так і безперервно, на машинах безперервного лиття заготовок (далі – МБЛЗ). Під час процесу розливання необхідно контролювати нерівномірність розподілу температури. Через це виникають теплові напруги, які можуть призвести до виникнення тріщин у злитку. При неперервному розливанні особливо важливо вміти запобігати прориву рідкої сталі. Дослідження, представлене у [1], проводилося з метою розробки та випробування системи управління для МБЛЗ.

Завдання розробки системи керування процесом кристалізації металу на МБЛЗ із використанням систем оцінювання їх теплового стану ускладнюється його характерними властивостями.

Зокрема, процес кристалізації сталевого злитка відбувається в умовах складного накладення процесів конвективного переміщення рідкого металу, росту кристалів та інших фізико-хімічних явищ. Структура злитка визначається взаємодією усіх цих складних факторів. З урахуванням вказаних особливостей, можна вважати перспективним для автоматизації процесів керування тепловим режимом кристалізатора МБЛЗ використання методів теорії керування на основі прогнозуючих моделей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основна проблема, що вирішується у цій роботі, – вдосконалення процесу керування охолодженням заготовок для отримання заданої якості і температурного стану на виході з МБЛЗ. У роботі враховані результати досліджень А.Г. Бутковського, Т.К. Сіразетдінова, Ш.Л. Ліонса, В.І. Панфьорова в області теорії управління та методів оптиміза-

ції; Д.П. Євтеєва, В.Т. Борисова, В.Г. Лісієнко та інших в області розробки теоретичних положень, практичної розробки, впровадження та експлуатації машин безперервного лиття заготовок.

У роботі [7] в загальній постановці розвинена математична модель, яка розглядає кристалізацію безперервного злитка як результат одночасного протікання теплових, дифузійних і гідродинамічних явищ. Така модель представляє великий принциповий інтерес з точки зору дослідження умов отримання бездефектного литого металу, оскільки картина фізичних явищ, що протікають у твердій, рідкій і двофазній зонах, складається із сукупності взаємопов'язаних процесів тепло-масо-переносу. Але практична реалізація такої складної моделі зустрічає серйозні труднощі. У зв'язку з цим в інженерній практиці використовують спрощені варіанти подібної моделі для досягнення головної мети – дослідження теплових режимів формування безперервного злитка.

У роботі [8] була зроблена спроба побудови математичної моделі кристалізації злитка, що враховує закономірності росту кристалів у переохолоджених зонах розплаву, а також нестационарне і нерівномірне по перетину злитка поле температур. Однак у цій моделі зустрілися методичні труднощі через невизначеність величини об'ємної концентрації центрів кристалізації і не досить обґрунтоване прийняття лінійної залежності швидкості росту кристалів, від переохолодження для сталей. Крім того, модель вийшла громіздкою, що ускладнює її реалізацію на ЕОМ.

У зв'язку з цим більш доступними і зручними є моделі, не пов'язані з кінетикою зародження і росту кристалів. Останнім часом для вирішення завдань затвердіння металевих сплавів широко використовують теорію квазі-рівноважної двофазної зони, розвинену у роботах [9; 10]. Ця теорія не враховує кінетичного і концентраційного (або дифузійного) переохолодження розплаву, оскільки їх величини для реальних умов замалі. Однак практичне вирішення наведеної системи рівнянь також зустрічає низку методичних труднощів.

**Постановка завдання.** У роботі необхідно виконати математичне моделювання та дослідження ефективності розроблених моделей і методів оцінювання теплового стану заготовок та алгоритмів керування процесом кристалізації металу на МБЛЗ для покращення якісних характеристик кінцевого продукту, зниження його собівартості за рахунок автоматизації процесу із застосуванням методів оцінювання теплового стану заготовок і методів адаптивного керування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Процес безперервного розливання металу забезпечує послідовну розливу певної кількості ківшів, що подаються від сталеплавильних агрегатів, а отримувана заготовка при цьому розрізається на мірні довжини відповідно до вимог споживачів і потім відправляється на перекат у відповідні прокатні цехи. При цьому вихід придатної заготовки становить 98,5-99,5% від маси розливої рідкої сталі.

Процес безперервного розливання сталі полягає у тому, що рідка сталь зі сталерозливного ківша надходить у проміжний ківш, а далі – в інтенсивно охолоджувану наскрізну форму прямокутного, квадратного, круглого або спеціального фасонного перерізу – кристалізатор, де відбувається часткове затвердіння злитка, що безперервно витягується, і утворюється тверда оболонка, заповнена рідкою сталлю по формі й перетину, відповідна готовій заготовці.

Кристалізатор є одним із найбільш функціонально важливих вузлів, що визначають раціональну роботу МБЛЗ і оптимальну якість неперервно литої заготовки. Особливістю роботи кристалізатора є інтенсивний відвід тепла від заготовлі. Управління першою стадією кристалізації здебільшого зводиться до управління тепловим режимом кристалізатора (при постійній швидкості розливання), що полягає в стабілізації різниці (перепаду) між температурою води на виході і вході в канали кристалізатора шляхом зміни витрати води. Величина перепаду вибирається максимальною, яка відповідає розрахунковій температурі води на вході у кристалізатор, і гранично допустимою (за умовами відкладення солей) температурі води на виході з нього. Ця умова відповідає мінімальній витраті охолоджувальної води.

Забезпечення необхідного температурного режиму при виробництві заготовок на МБЛЗ є однією з основних технологічних задач. Температурний режим визначає швидкість затвердіння сталі, глибину рідкої лунки, фізико-механічні характеристики сталі. Нерівномірність температурного поля по перерізу і довжині заготовки призводить до температурних деформацій, які можуть виходити за межі пружності і текучості. Швидкість охолодження визначає структурні перетворення у сталі, тобто робить внесок у формування властивостей готового виробу [6-8].

Для дослідження теплових процесів, що протікають у застигаючому злитку під час його проходження МБЛЗ, розроблено кілька фізико-математичних теорій. Найбільшого поширення набули два підходи до вивчення процесів затвер-

діння злитків. Перший представлений у літературі як задача Стефана, другий – як теорія двофазної зони [9].

Повна модель двофазної зони бінарного сплаву представляє собою систему диференціальних рівнянь, яка охоплює рівняння енергії, масопереносу, нерозривності середовища та стану системи. При прийнятій розрахунковій схемі математична модель теплообміну є двовимірним нелінійним диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності для області, що охоплює рідку і тверду фази злитка.

Відповідно до прийнятої схеми теплообмін описується таким рівнянням:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x_2} \right], \quad (1)$$

де  $c = c(x_1, x_2, z, T)$  – питома масова теплоємність;  $\rho = \rho(x_1, x_2, z, T)$  – щільність;  $x_1, x_2, z$  – поточні координати;  $\tau$  – час;  $\lambda(x_1, x_2, z, T)$  – коефіцієнт теплопровідності.

Таким чином, для подальших досліджень складена математична модель теплообміну у неперервному злитку, що враховує нестационарну температурну залежність теплофізичних параметрів і трансляційне перенесення теплоти вздовж технологічної осі. З урахуванням сумірності розмірів граней злитка у поперечному перерізі температурне поле розглядається тримірним.

У динамічних режимах роботи МБЛЗ швидкість розливки сталі може бути величиною змінною. Це вимагає удосконалення математичної моделі (1) для урахування змінної швидкості плавки. Також у цьому випадку краще використовувати модель у декартовій тривимірній системі координат, що дозволяє визначити температуру по всьому об'єму заготовок у часі.

У запропонованій динамічній моделі враховуються вхідні теплофізичні властивості сталі, кристалізатора, зон охолодження і просторова конфігурація МБЛЗ. Диференціальне рівняння теплопровідності у координатах із внутрішніми джерелами тепла (система координат нерухома, щодо неї зі швидкістю рухаються неперервно литі заготовки (вісь  $z$  направлена по осі руху, осі  $x$  і  $y$  – по товщині і ширині заготовок) має такий вигляд:

$$\rho(t)C(t)\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_x(\tau)\frac{\partial t}{\partial z}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda(t)\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\lambda(t)\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\lambda(t)\partial t}{\partial z}\right) + q_n, \quad (2)$$

де  $t = f(x, y, z, \tau_0)$  – температурне поле, °C;  $\tau$  – час, с;  $V_x(\tau)$  – швидкість розливання в певний момент часу, м/с;  $q_n$  – щільність внутрішніх дже-

рел теплоти, Вт/м<sup>3</sup>;  $C(t)$  – питома теплоємність сталі при певній температурі, кДж/кг·K;  $\rho(t)$  – щільність сталі при такій температурі, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda(t)$  – коефіцієнт ефективної теплопровідності при певній температурі, Вт/м·K.

Для обліку теплоти кристалізації, що виділяється, вводиться величина відносної кількості твердої фази  $\varphi = v_{me}/v_0$ . За змістом вона може розглядатися як відносна кількість ще не виділеного тепла кристалізації,  $v_0$  та  $v_{me}$  – як обсяги усього розплаву і твердої фази;  $\varphi = 0$  для рідкої фази,  $\varphi = 1$  для твердої фази, а для двофазної зони може змінюватися від нуля до одиниці.

Із введенням величини  $\varphi$  для застигаючого шару вираз (2) запишеться у вигляді:

$$\rho(t)C(t)\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + V_x(\tau)\frac{\partial t}{\partial z}\right) = \text{div}(\lambda(t)\text{grad}t) + \Delta h_\varphi \left( \frac{\rho_{me}\partial\varphi(t)}{\partial \tau} + V_x(\tau)\frac{\rho_{me}\partial\varphi(t)t}{\partial z} \right) + q_{cm}, \quad (3)$$

де  $\Delta h_\varphi$  – тепло, що виділяється при фазовому переході, кДж/кг;  $\rho_{me}$  – щільність затверділої сталі, кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi(t)$  – відносна кількість твердої фази;  $q_{cm}$  – щільність внутрішніх джерел теплоти за рахунок структурних переходів, Вт/м<sup>3</sup>.

На основі запропонованих моделей (1, 3) із застосуванням пакету *Matlab PDE Toolbox* була розроблена цифрова модель процесу теплообміну у кристалізаторі МБЛЗ, що дозволяє виконувати моделювання процесу теплообміну в процесі охолодження заготовки.

На першому етапі необхідно визначити форму та розміри заготовки. Геометрична фігура (рис. 1) – квадрат січенням 150\*150 мм – задається вручну або за допомогою вікна *Object Dialog*.

На другому етапі необхідно визначити для кожної з граней заготовки граничні умови, що є однаковими для кожної сторони (оскільки у поперечному перерізі заготовка являє собою квадрат) (рис. 2) і визначаються температурою стінок кристалізатора у певний момент часу.

Рівняння (1, 3), що описують тепловий стан заготовки у процесі кристалізації, є диференціальними рівняннями параболічного типу з параметрами  $\rho$  – коефіцієнт теплопровідності,  $C$  – питома масова теплоємність,  $k$  – щільність,  $Q$  – об'ємна щільність потужності сторонніх джерел тепла (рис. 3).

Оскільки теплофізичні параметри процесу є нелінійними, залежать від температури, то коефіцієнти диференційного рівняння теплообміну є не скалярними величинами, а їх необхідно представити у вигляді кусочно-лінійних функцій, створених у *Matlab*. Так, для опису залежності коефі-

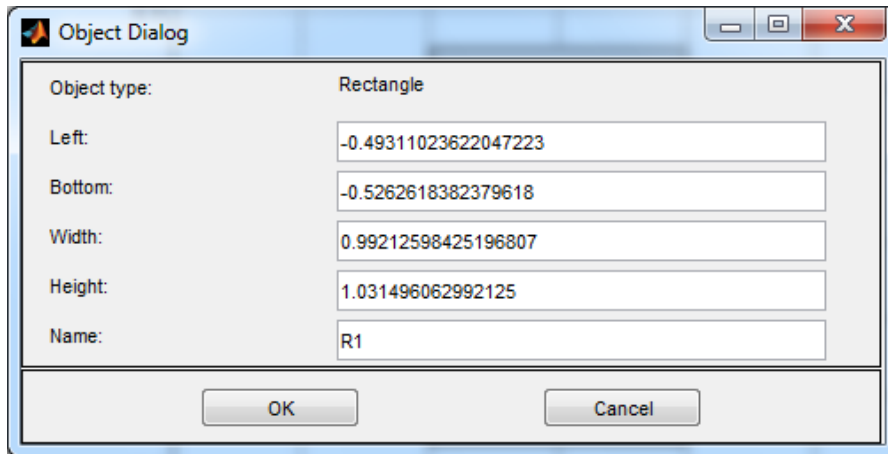


Рис. 1. Параметри геометричної фігури

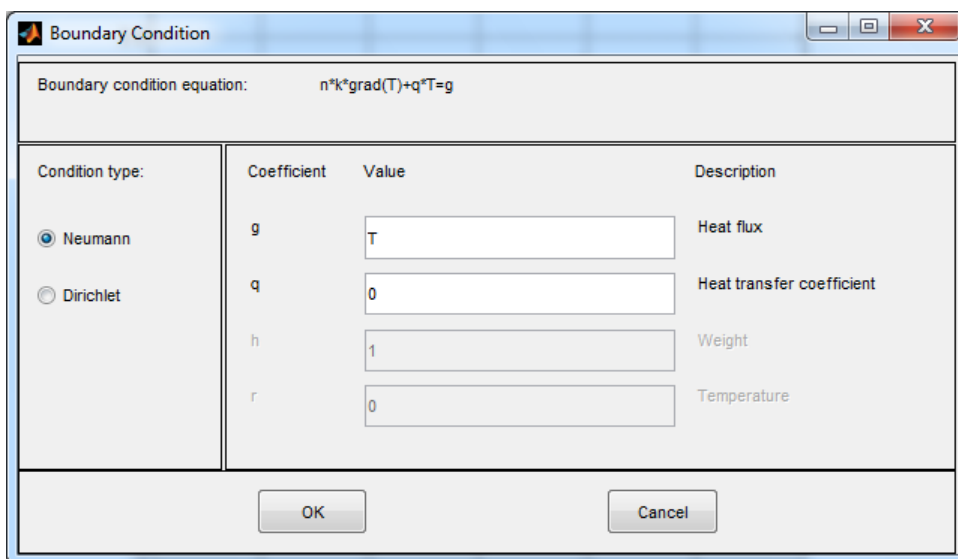


Рис. 2. Граничні умови для сторони заготовки

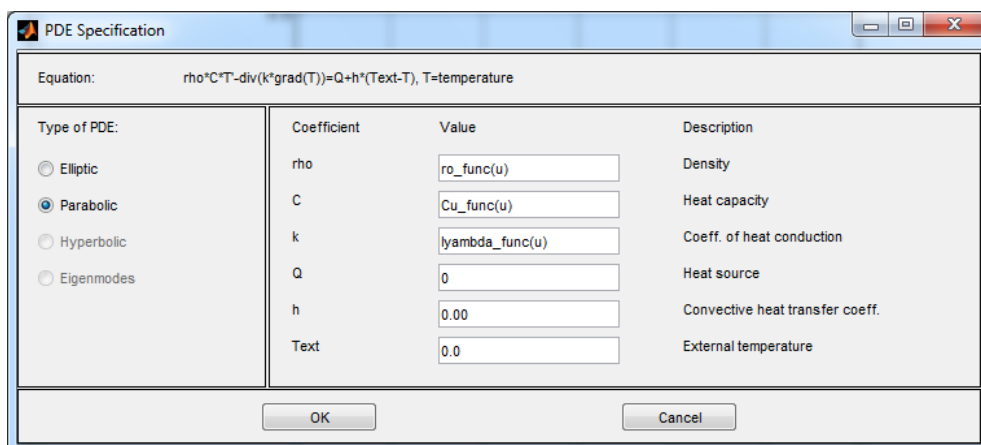


Рис. 3. Диференціальне рівняння параболічного типу

цієнту теплопровідності від температури металу створено функцію  $ro\_func(u)$ , яка як параметр приймає вихідну величину моделі PDE – функцію розподілу температури металу у заготовці та

функції  $Cu\_func(u)$  і  $lyambda\_func(u)$ , які реалізують залежність масової теплоємності від температури металу та повертають щільність теплопровідності залежно від його температури.

Далі була сформована кінцево-елементна сітка (рис. 4), від щільності точок якої залежить швидкість розрахунку та точність розрахунку моделі й налаштовані параметри розв'язувача *PDE* у вікні *Plot Selection* (рис. 5).

Значення *temperature* у параметрі *Height (3-D plot)* дозволить бачити зміну температури металу у реальному часі на поверхні всієї заготовки у трьох вимірах (рис. 6).

Експортуючи дані моделювання до вікна *Workspace* пакету *Matlab*, маємо змогу у подальшому будувати залежність розподілу температури уздовж поверхні злитку, оцінювати товщину застигаючої кірки металу. Так, на рис. 7 представлені графіки розподілу температури уздовж поверхні на деякій відстані від поверхні і на осі злитка. Із результатів моделювання видно, що кривизна злитка тягне за собою асиметрію температурного поля. Навіть при однаковій інтенсивності охолодження на поверхнях внутрішнього і зовнішнього радіусів температура на зовнішній поверхні трохи нижча. Таке ж явище спостерігається у виробничих умовах.

На рис. 8 представлені графіки залежності глибини рідкої фази від швидкості витягування злитка при різних режимах охолодження.

**Висновки.** Отриманий математичний опис задачі теплопровідності для неперервнолитих заготовок дозволяє, на відміну від відомих моделей, виконувати розрахунок температури заготовок по всьому об'єму в реальному масштабі часу з урахуванням тепловиділення при фазовій і структурній трансформаціях з урахуванням тепловіддачі внаслідок водяного охолодження, теплового випромінювання, природної і вимушеної конвекції.

Якщо взяти до уваги той факт, що наявні МБЛЗ розливають сталь із різним хімічним складом застигаючого металу, з різною газонасиченістю, температурою і швидкістю розливання металу, протяжністю зони двофазного стану, тривалістю затвердіння, формою готової заготовки та у різних за технічними характеристиками кристалізаторах, то відповідний підхід дозволить скоротити до мінімуму витрати, пов'язані з пристосуванням розробленої системи керування до особливостей конкретної МБЛЗ.

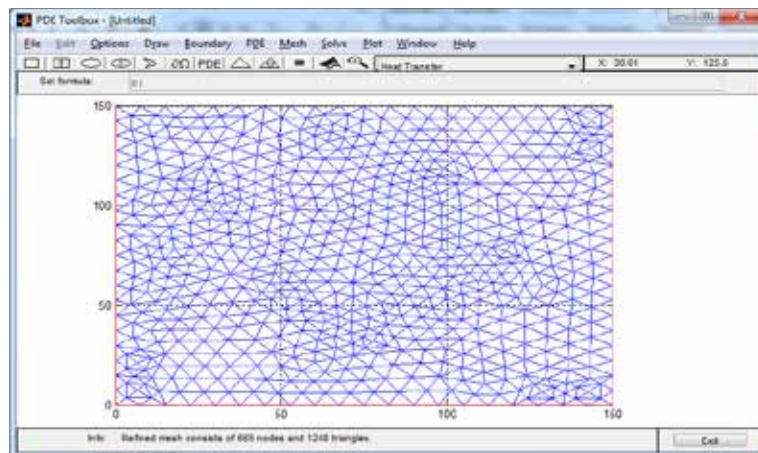


Рис. 4. Кінцево-елементна сітка моделі



Рис. 5. Налаштування параметрів візуалізації моделі



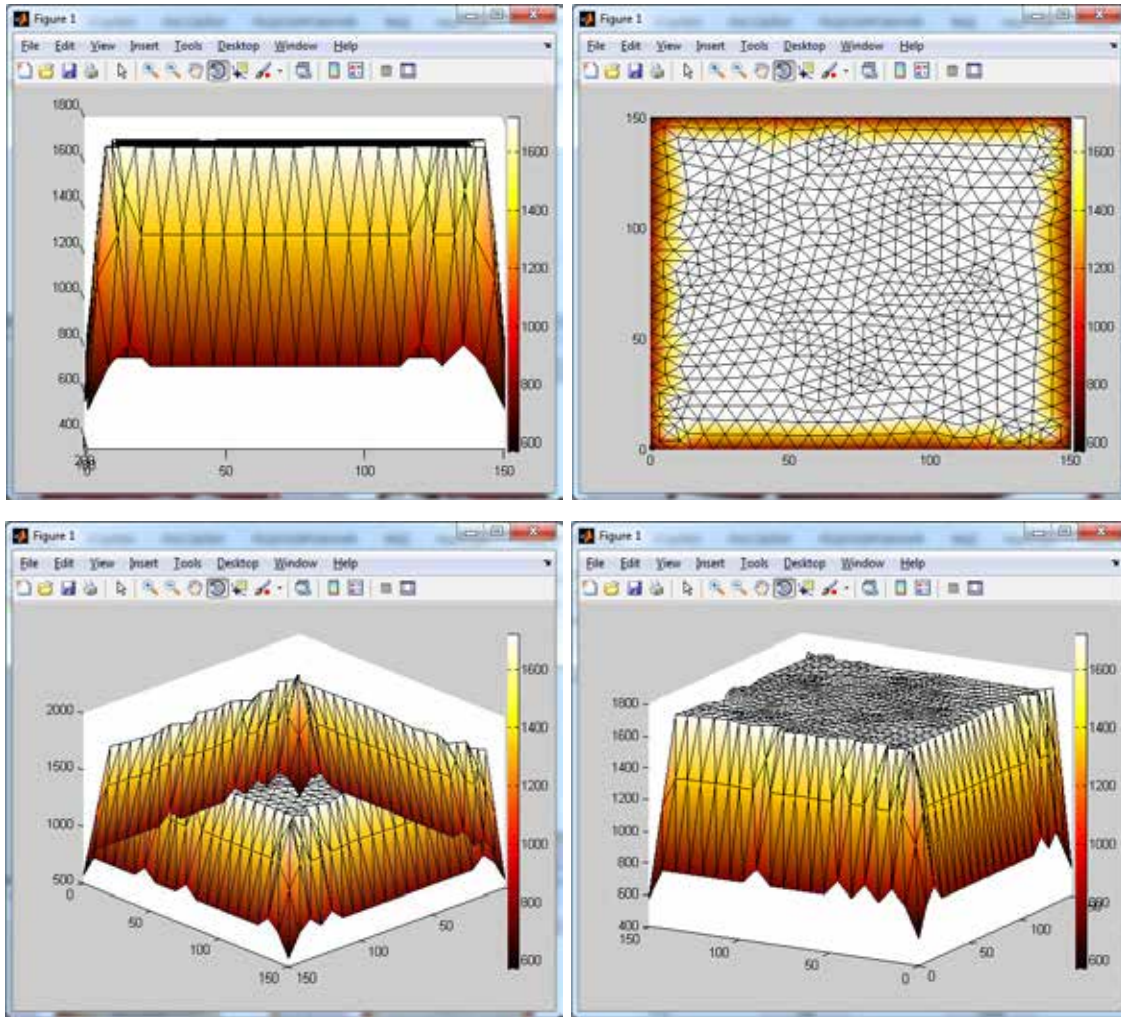


Рис. 6. Моделювання теплового стану заготовок

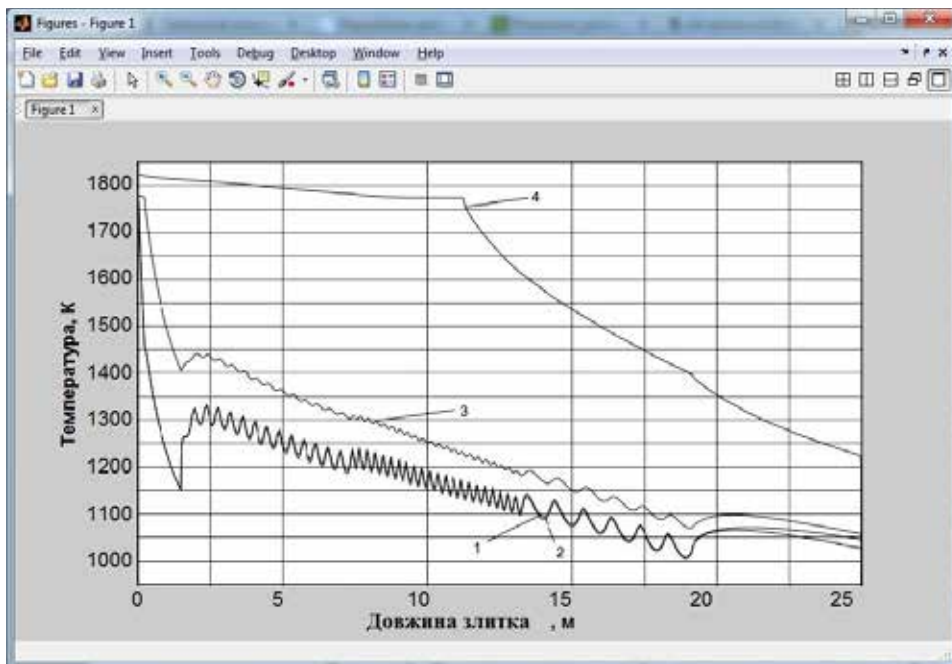


Рис. 7. Температура злитка: 1 – внутрішня поверхня, 2 – зовнішня поверхня, 3 – на відстані 4 мм від зовнішньої поверхні, 4 – на осі злитка

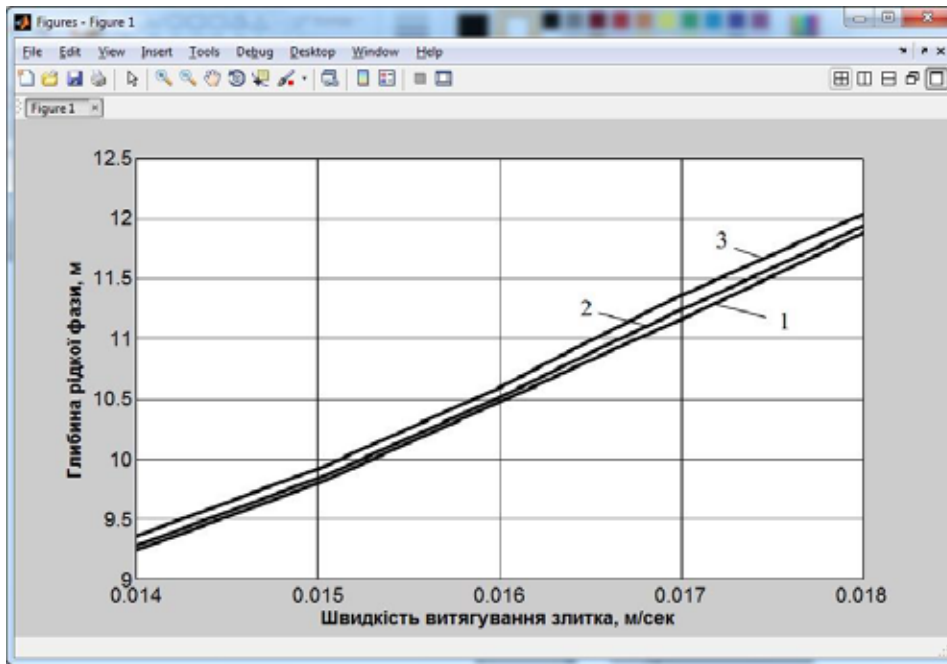


Рис. 8. Глибина рідкої фази залежно від швидкості витягування злитка

#### Список літератури:

1. Рей У. Методи управління технологічними процесами: переклад з англійського. М. : Мир, 1983. 368 с.
2. P.J. Flint, Q.L. he, R.B. Mahapatra, J. Herbertson. "Numerical model of heat transfer, fluid flow and solidification in the continuous steel slab caster" in Modelling of casting processes and solidification microstructures. BHP and Comalco (1992).
3. P.N. Hansen, E. Flender, G.C. Hartman. "MAGMASOFT – The MAGMA system of Mold filling and solidification modelling" in Numerical Simulation of casting solidification in automotive applications. The Minerals, Metals and Materials Society, 1991. P. 221.
4. X. Xue, S.F. Hansen, P.N. Hansen. "Numerical Simulation and Experimental Verification of Mold Filling Process through Less-depressurized and Depressurized gating systems". Pre-published, 1992.
5. Y. Iwata, Y. Yamamoto, K. Kagami. "Computer simulation of molten metal flow in thin plate die castings". Die Casting Association. 1991.
6. Irving W.R. Continuous Casting of Steel / W.R. Irving // Institute of Metals. London, 1993. P. 182–185.
7. Thomas B.G. Continuous Casting of Steel / B.G. Thomas // Modeling and Simulation for Casting and Solidification Processing. Chap. 15. O. Yu. editor. Marcel Dekker. New York, 2001. P. 499–540.
8. И.О. Мищенко. Моделирование и оптимизация температурного поля непрерывнолитого слитка. Известия вуз. Черная металлургия. 2006, № 3. С. 15–21.
9. Теория квазиравновесной кристаллизации металлических сплавов / В.Т. Борисов, В.В. Виноградов, В.А. Ефимов, В.А. Журавлев // Кристаллизация и компьютерные модели: Всесоюзная конф. по проблемам кристаллизации сплавов и компьютерного моделирования. Ижевск, 1991. С. 5–10.

#### **Marynych I.A., Serdiuk O.Yu. MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL STATE OF WORKPIECES FOR IMPROVEMENT OF CONTROL OF METAL CRYSTALLIZATION PROCESS ON CONTINUOUS CASTING MACHINE**

*Article considers development of mathematical model that takes into account uneven temperature distribution in the workpiece during the casting process, for early prediction and formation of control effects to prevent thermal stresses that can lead to cracking and breakthrough of liquid steel in continuously cast ingot. Practical significance lies in application of obtained mathematical model in construction of an adaptive automatic control system, which in turn will reduce amount of waste and reduce time of emergency downtime due to breakthroughs of liquid steel.*

*Continuously cast billets are main raw material for production of rolled products and quality of billets determines quality of finished metal product. One of the main problems encountered when pouring metal on*

*machine for continuous casting of workpieces of radial-curved type is presence of cracks and liquation zones in internal structure of metal, as well as on surface of workpiece. One of causes of defects in continuous billets is thermal stress. Reduction of thermal stresses is provided by means of increase of quality of management in ACS of TP due to introduction of optimum management of workpieces cooling.*

*Problem of quality improving of workpieces is solved by optimizing of workpieces' cooling process through applying of adaptive automatic temperature control system of workpieces continuous casting machine, which uses the developed mathematical model of cooling process of workpieces, that is different from those known in time at variable casting speed of workpiece and taking into account heat of crystallization, structural transitions of steel, heat transfer due to water cooling.*

**Key words:** *automation, continuous billet casting machine, mathematical model, crystallizer, continuous cast billet, temperature field.*

**Мельник О.Г.**

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України

**Мельник Р.П.**

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України

## РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ УПРАВЛІННЯ СИЛАМИ ТА ЗАСОБАМИ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ В УМОВАХ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ

*Дослідження присвячено розробленню сучасного методу захисту інформації інформаційно-аналітичних систем цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій і Центрів безпеки громадян в умовах децентралізації для здійснення надійного та швидкого управління, координації дій.*

*Визначено управлінські процеси, які відбуваються в інформаційно-аналітичних системах цивільного захисту і потребують захисту інформації, в результаті чого побудовано діяльнісну модель державного управління у сфері цивільного захисту в умовах децентралізації. Доведено, що всі стратегічні дії в умовах реформування місцевого самоврядування супроводжуються складними інформаційними процесами, більшість із яких мають конфіденційний характер і потребують надійного захисту.*

*Розроблено метод захисту інформаційних ресурсів Державної служби України з надзвичайних ситуацій і Центрів безпеки громадян на основі розширених матричних операцій криптографічного перетворення, а також розроблено модель процесу реалізації операцій розширеного матричного криптографічного перетворення.*

*Перевірено статистичні властивості результатів розширеного матричного криптографічного перетворення текстової інформації на прикладі електронних інформаційних ресурсів. Побудовано статистичний портрет програмної реалізації методу захисту інформації на основі розширених матричних операцій криптографічного перетворення. Проведено тестування за методикою NIST Statistical test Suite, на основі якого зроблено висновок, що запропонований метод розширеного матричного криптографічного перетворення придатний для використання в інформаційно-аналітичних системах цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій і Центрів безпеки громадян.*

**Ключові слова:** інформаційно-аналітична система, цивільний захист, Центр безпеки громадян, діяльнісна модель державного управління, розширені матричні операції криптографічного перетворення.

**Постановка проблеми.** Захист населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій (далі – НС) шляхом запобігання таким ситуаціям, ліквідації їх наслідків і надання допомоги постраждалим у мирний час та в особливий період – одна з основних функцій держави [1]. Організація цивільного захисту в Україні безпосередньо пов'язана з національною безпекою. Так, згідно зі статтею 12 [2] Державна служба України з надзвичайних ситуацій (далі – ДСНС України) входить до складу сил безпеки, на які Конституцією та законами України покладено функції із забезпечення національної безпеки держави.

Нині в Україні активно відбувається реформування місцевого самоврядування та територіальної організації влади [3]. Реформа децентралізації створила передумови для формування нової якості послуг, які отримують мешканці об'єднаних територіальних громад (далі – ОТГ). У межах секторальної децентралізації створюються Центри безпеки громадян (далі – ЦБГ), що насамперед дозволяють громадам забезпечити належний рівень безпеки життєдіяльності громадян, ефективно організувати свою роботу з питань цивільного захисту. Тому державна політика України в сфері місцевого самоврядування повинна спиратися саме на інтереси жителів

територіальних громад, безпеку їх життєдіяльності, захист від НС.

Згідно з «Концепцією реформування місцевого самоврядування та територіальної організації влади в Україні» [3] до основних повноважень органів місцевого самоврядування на різних рівнях адміністративно-територіального устрою належить гасіння пожеж, забезпечення громадської безпеки, охорони навколишнього природного середовища, надання послуг швидкої медичної допомоги, первинної охорони здоров'я, з профілактики хвороб, санітарно-епідеміологічного захисту. Якісне виконання усіх зазначених вище функцій у період активної діджиталізації країни передбачає обмін великою кількістю інформації, яку нині розглядають як один із основних ресурсів розвитку суспільства, а інформаційні системи й технології – як засіб підвищення продуктивності та ефективності роботи людей. Тому інформація є найціннішим і дорогим ресурсом. Інформаційна технологія визначає процеси передачі та розповсюдження, зберігання і обробки інформації, її використання з певною метою. Усі ці процеси повинні бути швидкими, найменш витратними, максимально корисними, зручними та автоматизованими.

Сучасні інформаційні технології потребують організації високого рівня захисту даних, оскільки оперативна доставка інформації в процесі повсякденної діяльності в умовах децентралізації, а саме створення ЦБГ в ОТГ, оперативна взаємодія з органами державного управління та місцевого самоврядування, іншими міністерствами та відомствами супроводжуються складними інформаційними процесами [4], більшість із яких мають конфіденційний характер.

Стратегічно правильним вирішенням проблеми захисту інформації є використання досягнень криптографії, оскільки вона розширює можливості захисту інформації та забезпечує її безпеку в мережі. Тому перед нами ставилося важливе науково-технічне завдання – розроблення сучасного методу захисту інформації інформаційно-аналітичних систем для здійснення надійного та швидкого управління силами й засобами цивільного захисту в умовах децентралізації та координації дій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед останніх досліджень і публікацій варто виділити [5], де обґрунтовано необхідність створення комплексних систем захисту інформації в розподілених корпоративних мережах, в яких обробляється інформація з обмеженим досту-

пом. У наукових роботах [6; 7] розроблено метод захисту конфіденційної інформації ДСНС України на основі використання операцій розширеного матричного криптографічного перетворення та запропоновано впровадження в телекомунікаційну мережу ДСНС України удосконаленої системи моніторингових спостережень за інцидентами з розрахунком можливості реалізації загроз безпеки інформації. Наукове дослідження [8] присвячене проектуванню сучасних методів і технічних засобів цивільного захисту, що стали основою для створення інформаційних систем із попередження виникнення пожеж і передачі оперативної інформації для прийняття управлінських рішень.

Активний розвиток інформатизації в системі ДСНС України та ОТГ у сфері цивільного захисту зумовлює значне зростання відомчих інформаційних активів, у тому числі конфіденційного характеру, вимагає ухвалення адекватних і своєчасних рішень по нарощуванню потенціалу системи захисту інформації в області протидії нанесенню шкоди інформаційній безпеці, що зростає в міру інтенсифікації розвитку інформаційних технологій. Це дозволяє стверджувати, що наукове дослідження щодо удосконалення захисту інформації в інформаційно-аналітичній системі цивільного захисту, а саме розробки та застосування методу розширеного матричного криптографічного перетворення, є доцільним.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є визначення управлінських процесів, які відбуваються в інформаційно-аналітичних системах ДСНС України та ЦБГ, що потребують захисту інформації, розроблення методу захисту інформаційних ресурсів ДСНС України та ЦБГ.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі задачі:

- побудувати діяльнісну модель державного управління в сфері цивільного захисту в умовах децентралізації;

- розробити метод захисту інформаційних ресурсів ДСНС України та ЦБГ на основі розширених матричних операцій криптографічного перетворення;

- перевірити статистичні властивості результатів розширеного матричного криптографічного перетворення текстової інформації на прикладі електронних інформаційних ресурсів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Опираючись на викладене вище, побудуємо сучасну діяльнісну модель державного управління в сфері цивільного захисту в умовах децентраліза-



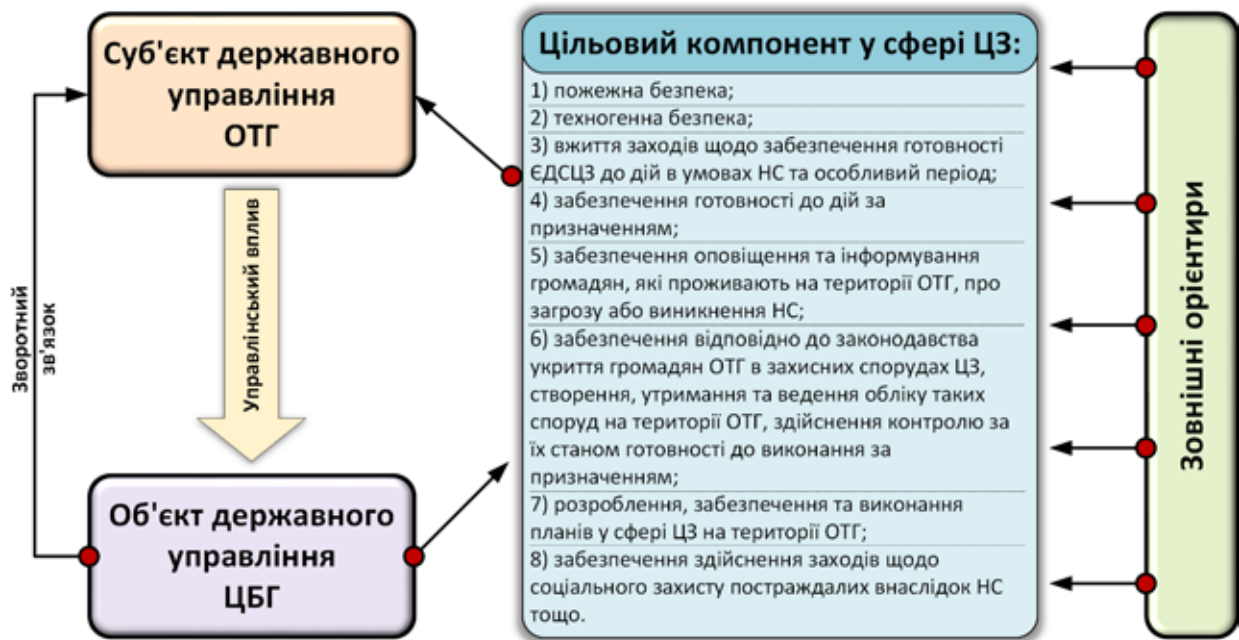


Рис. 1. Діяльнісна модель державного управління в сфері цивільного захисту в умовах децентралізації

ції (рис. 1). Так, зовнішні орієнтири (наприклад, за статистикою понад 40% усіх пожеж відбуваються у сільській місцевості, під час яких травмуються та гинуть люди, зазнають значних матеріальних збитків громади. Оскільки в ОТГ об'єднується велика кількість населених пунктів, це призводить до значного збільшення часу прибуття пожежно-рятувальних підрозділів до найбільш віддалених частин ОТГ) мають вплив на формування цільового компонента в сфері цивільного захисту.

Згідно з новою редакцією Закону України «Про місцеве самоврядування в Україні» [9] в складі повноважень, що виконуються радою громади чи її виконавчим органом, визначено окремим блоком повноваження у сфері цивільного захисту (частина 13 статті 35 законопроекту). В разі прийняття Верховною Радою України цього Закону основним завданням ОТГ буде забезпечення захисту населення і територій від НС.

У будь-якому випадку всі ці стратегічні дії в умовах реформування місцевого самоврядування супроводжуються складними інформаційними процесами, більшість із яких мають конфіденційний характер. Сучасні інформаційні технології потребують організації високого рівня захисту даних ОТГ. Стратегічно правильним вирішенням проблеми захисту інформації є використання досягнень криптографії, оскільки вона розширює можливості захисту інформації та забезпечує її безпеку в мережі. У [6] доведено, що використання розширених матричних функцій криптографічного перетворення підвищує швидкодю

обробки даних у криптосистемах за рахунок паралельного процесу виконання операцій криптоперетворення.

Швидкодія обробки даних і конфіденційність прийняття управлінських рішень є найважливішими параметрами інформаційного обміну між центральним органом виконавчої влади, який реалізує державну політику у сфері цивільного захисту, в ролі якого виступає ДСНС України, та ЦБГ ОТГ. Тому впровадження сучасних інформаційних і телекомунікаційних технологій забезпечить результативність виконання завдань в області цивільного захисту.

Нами розроблений метод захисту інформаційних ресурсів ДСНС України та ЦБГ на основі розширених матричних операцій криптографічного перетворення:

1. На основі даних пароля сформулювати первинну, не вироджену матрицю криптографічного перетворення.

2. Корекція матриці криптографічного перетворення на основі псевдовипадкової послідовності.

3. Перевірка правильності синтезу матриці криптографічного перетворення.

4. Криптографічне перетворення інформації на основі матриць криптографічного перетворення.

5. На основі псевдовипадкової послідовності будуються операції розширеного матричного криптографічного перетворення у випадково вибраній кількості.

6. Криптографічне перетворення інформації на основі розширеного матричного криптографічного перетворення.

7. Перехід до наступного циклу криптографічного перетворення (пункту 2) за наявності вхідної інформації.

Модель процесу реалізації операцій розширеного матричного криптографічного перетворення представлена на рис. 2.

Перевіримо статистичні властивості результатів розширеного матричного криптографічного пере-

творення текстової інформації на прикладі електронних інформаційних ресурсів. Статичний портрет програмної реалізації алгоритму модифікованого розширеного матричного криптографічного перетворення тестового файлу зображено на рис. 3.

Досліджувана послідовність пройшла комплексний контроль за методикою NIST STS (NIST Statistical test Suite). Такий набір тестів був запропонований під час проведення конкурсу на новий національний стандарт США блокового шифрування. Цей набір використовувався для дослі-

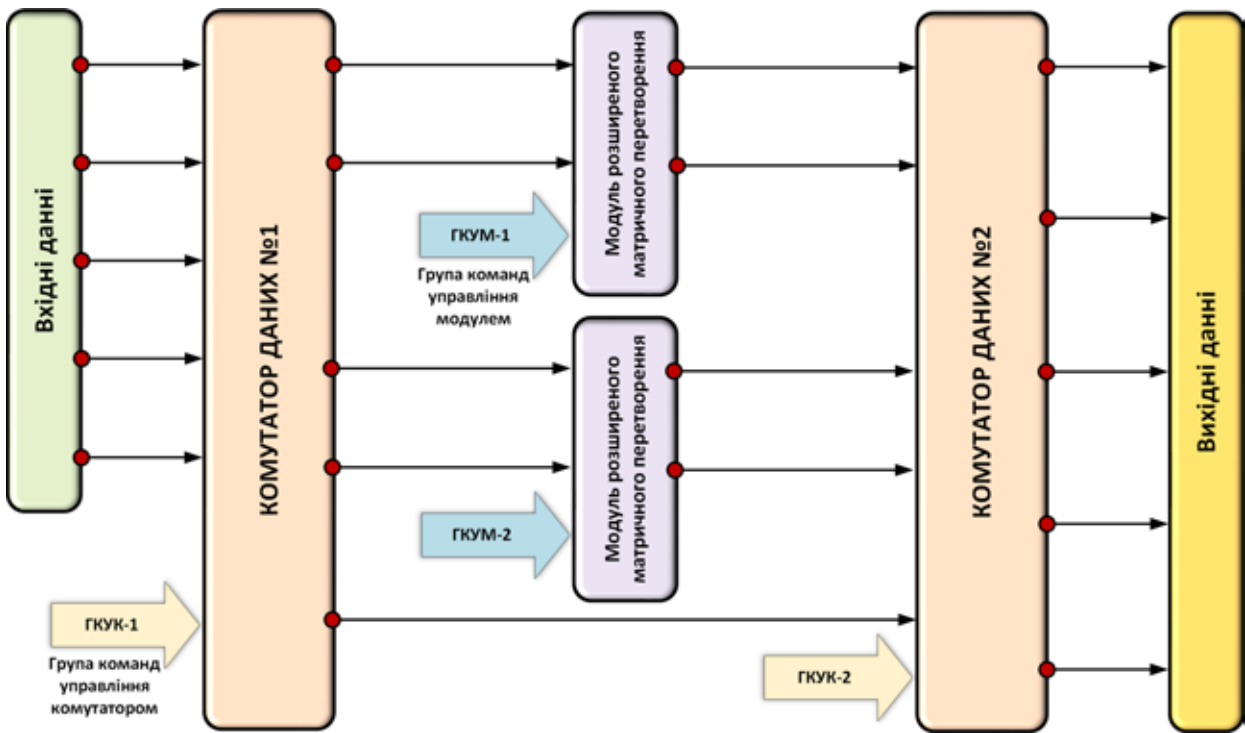


Рис. 2. Модель процесу реалізації операцій розширеного матричного криптографічного перетворення

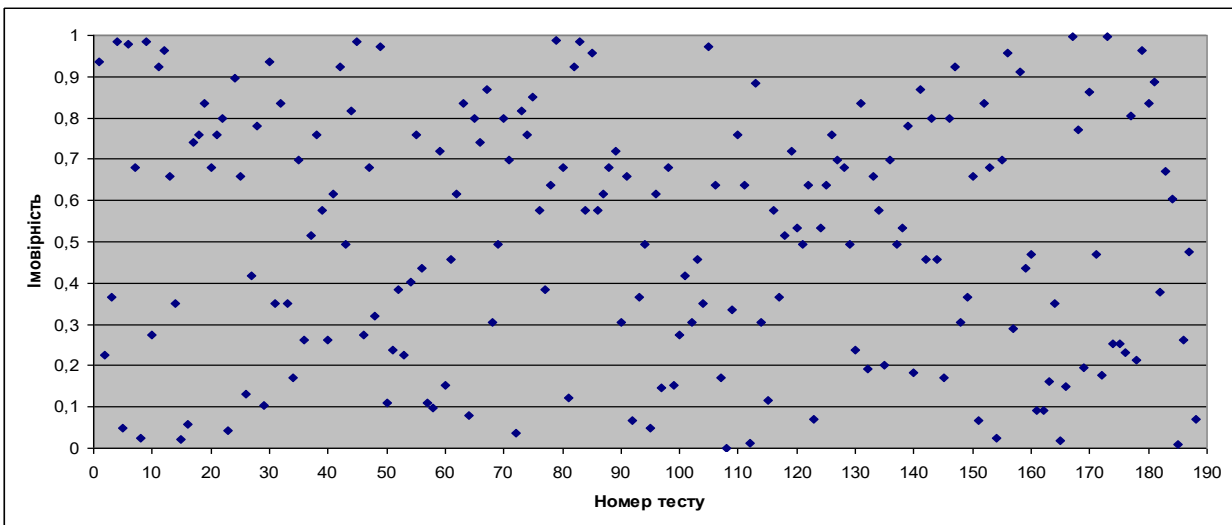


Рис. 3. Статистичний портрет програмної реалізації методу захисту інформації на основі розширених матричних операцій криптографічного перетворення

дження статистичних властивостей кандидатів на новий блоковий шифр. Нині методика тестування, запропонована NIST, є найбільш поширеною у розробників криптографічних засобів захисту інформації.

Відповідно до результатів оцінки програмної реалізації операцій розширеного матричного перетворення кількість тестів, у яких тестування пройшли понад 99% послідовностей, становить 127 (68%), а кількість тестів, у яких тестування пройшли більше 96% послідовностей, 189 (100%).

Аналіз результатів тестування дозволив зробити висновок, що запропонований метод розширеного матричного криптографічного перетворення придатний для використання в інформаційно-аналітичних системах цивільного захисту ДСНС України та ЦБГ.

**Висновки.** В цьому дослідженні вперше розв'язано важливе науково-технічне завдання розроблення сучасного методу захисту інформації інформаційно-аналітичних систем ДСНС України та ЦБГ для здійснення надійного та швидкого управління силами й засобами цивільного захисту в умовах децентралізації та координації дій.

Вперше побудовано діяльнісну модель державного управління в сфері цивільного захисту в умовах децентралізації. Розроблено метод захисту інформаційних ресурсів ДСНС України та ЦБГ на основі розширених матричних операцій криптографічного перетворення та перевірено статистичні властивості результатів розширеного матричного криптографічного перетворення текстової інформації на прикладі електронних інформаційних ресурсів.

#### Список літератури:

1. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення: 01.03.2021).
2. Про національну безпеку України : Закон України від 21.06.2018 № 2469-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19#Text> (дата звернення: 01.03.2021).
3. Про схвалення Концепції реформування місцевого самоврядування та територіальної організації влади в Україні : розпорядження Кабінету Міністрів України від 01.04.2014 № 333-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/333-2014-%D1%80#Text> (дата звернення: 01.03.2021).
4. Барило О.Г., Потеряйко С.П., Тищенко В.О. Інформаційне забезпечення органів державного управління у надзвичайних ситуаціях. *Науковий вісник Академії муніципального управління. Серія: Управління.* 2013. Вип. 4. С. 77–84.
5. Козачок В.А., Коваленко Ю.Б. Особливості побудови комплексних систем захисту інформації в розподілених корпоративних мережах. *Сучасний захист інформації.* 2015. № 1. С. 41–47.
6. Мельник Р.П., Мельник О.Г., Гончар С.В., Бабенко В.Г. Метод захисту конфіденційної інформації як складник управління інформаційною безпекою ДСНС України. *Системи обробки інформації.* 2014. Вип. 4 (120). С. 145–148.
7. Мельник Р.П., Мельник О.Г., Чепурний Г.П. Підвищення інформаційної безпеки телекомунікаційної системи ДСНС України шляхом моніторингу інцидентів та оцінки ризику реалізації загроз безпеки. *Наукові праці : науково-методичний журнал.* 2016. Вип. 271. Т. 283. Комп'ютерні технології. С. 65–69.
8. Мельник О.Г., Мельник Р.П. Проектування засобів цивільного захисту для управління пожежною безпекою житлового фонду. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2020. Том 31 (70) № 5. С. 88–93.
9. Законопроекти для обговорення. URL: [https://decentralization.gov.ua/law\\_discussion/project](https://decentralization.gov.ua/law_discussion/project) (дата звернення: 01.03.2021).

#### **Melnyk O.G., Melnyk R.P. DEVELOPMENT OF THE METHOD OF INFORMATION PROTECTION OF INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEMS FOR MANAGEMENT OF FORCES AND MEANS OF CIVIL PROTECTION IN CONDITIONS OF DECENTRALIZATION**

*The research is devoted to the development of a modern method of information protection of information-analytical systems of civil protection of The State Emergency Service of Ukraine and Safety Centers of Citizens in the context of decentralization for reliable and rapid management, coordination.*

*The management processes that take place in the information-analytical systems of civil protection that require information protection are determined, as a result of which the activity model of public administration in the field of civil protection in the conditions of decentralization is built. It is proved that all strategic actions in the conditions of local self-government reform are accompanied by complex information processes, most of which are confidential and need reliable protection.*

*The method of protection of information resources of The State Emergency Service of Ukraine and Safety Centers of Citizens on the basis of extended matrix operations of cryptographic transformation is developed,*



*and also the model of process of realization of operations of extended matrix cryptographic transformation is developed.*

*The statistical properties of the results of the extended matrix cryptographic transformation of text information on the example of electronic information resources are checked. A statistical portrait of the software implementation of the method of information protection on the basis of extended matrix operations of cryptographic transformation is constructed. Testing was performed according to the NIST Statistical test Suite methodology, based on which it was concluded that the proposed method of extended matrix cryptographic transformation is suitable for use in information-analytical systems of civil protection of The State Emergency Service of Ukraine and Safety Centers of Citizens.*

**Key words:** *information-analytical system, civil protection, Safety Centers of Citizens, activity model of public administration, extended matrix operations of cryptographic transformation.*

**Мищенко І.Л.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ РЕГУЛЯТОРІВ В АВТОМАТИЧНІЙ СИСТЕМІ РЕГУЛЮВАННЯ ГРУПОЮ ПІДГРІВАЧІВ

*У статті досліджується можливість оптимізації структури системи регулювання групою підігрівачів для рівномірного розподілення навантаження між ними. Здебільшого система підігріву мережевої води складається з кількох послідовно розташованих підігрівачів, кожен з яких забезпечений власним регулятором. Завданням кожного з них є забезпечення заданої температури на виході кожного блоку.*

*Недоліком такої системи є те, що при надходженні значного зовнішнього збурення підвищення або зниження вихідної температури відбувається за рахунок першої установки і тільки якщо цього не досить, до роботи послідовно підключаються інші. Такі стрибки потужності призводять до прискореного та нерівномірного зносу обладнання, а тривала робота на занадто високій чи низькій потужності негативно впливає на коефіцієнт корисної дії установки і також прискорює знос, що завдає значної економічної шкоди в майбутньому.*

*Рівномірне розподілення навантаження дало б можливість використання всіх установок у номінальному чи близькому до нього режимі, а отже з оптимальними коефіцієнтом корисної дії і витратами на експлуатацію. Тому в роботі синтезована система регулювання, в якій завдання для локальних ПІ – регуляторів коригується з допомогою нечіткого регулятора залежно від збурення на вході в систему та проміжних значень температури на виході кожного підігрівача.*

*За результатами порівняння показників якості перехідних процесів регулювання вказаних вище структур зроблено висновок щодо доцільності використання синтезованої структури та її ефективності відносно базової системи. Підтвердження цього висновку чітко видно на приведених графіках моделювання.*

**Ключові слова:** група мережевих підігрівачів, автоматична система регулювання (АСР), нечітка логіка, оптимізація, нечіткий регулятор, перехідний процес регулювання.

**Постановка проблеми.** Як теплоносії для опалення застосовують воду і дуже рідко – пар, оскільки вода дає можливість перенесення теплоти на великі відстані з невеликим зниженням температури, зумовленим тільки тепловими втратами в навколишнє середовище, що дозволяє підтримувати менший тиск у відборі турбіни для забезпечення необхідної температури теплоносія у споживача. Крім того, водяні опалювальні системи мають більш низьку металоємність, вимагають менших капітальних і експлуатаційних витрат, в них простіше організувати централізоване регулювання відпустки теплоти.

Теплообмінники (теплообмінні апарати) енергоустановок є великогабаритним, металомістким і дорогим обладнанням, що істотно впливає, а в окремих випадках і визначає ефективність і надійність роботи теплових, атомних електростанцій та їх додаткового обладнання загалом [1]. Економічно нераціональним є дублювання такого дорогого обладнання, тому встановлення резерв-

них апаратів зустрічається вкрай рідко, що не дає змоги підвищити надійність системи. Ремонт окремої ділянки може паралізувати роботу всієї мережі. Тому кращим рішенням буде оптимальне використання існуючого обладнання з метою подовження строку його експлуатації до моменту повної заміни всієї технологічної ділянки.

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

У низці фундаментальних підручників і навчальних посібників із теплообмінних апаратів енергетичних установок [1] теплообмінники розглядалися лише як якийсь допоміжне обладнання в загальних схемах. За оцінками ОТІ і МЕІ, при незмінних параметрах теплоносія внесок у загальне підвищення коефіцієнта корисної дії, отриманий за рахунок поліпшення характеристик теплообмінних апаратів (конденсаторів, підігрівачів мережевої води і системи регенеративного підігріву живильної води), може досягати 30% [2]. Тому невелике ускладнення структури системи регулювання може дати можливість покра-

щити не тільки показники надійності, а й ефективності системи.

**Постановка завдання.** Необхідно синтезувати систему регулювання, яка б дозволила використання кожного підігрівача у номінальному режимі при будь-яких зовнішніх збуреннях.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для організації раціонального теплопостачання споживачів особливо велике значення має теплофікація, що є найбільш досконалим методом централізованого постачання теплової енергії та одним з основних шляхів зниження питомої витрати палива на вироблення електричної енергії.

Вода систем теплопостачання нагрівається в пароводяних теплообмінниках ТЕЦ здебільшого паром із відборів теплофікаційних турбін або з вихлопного патрубку турбін із протитиском і подається насосами по трубопроводах гарячої води до теплового споживача; після охолодження в опалювальних установках споживача вода повертається на ТЕЦ.

Система трубопроводів гарячої та охолодженої води утворює теплову мережу; вода, що циркулює по тепломережі, називається мережною водою; насоси, що підтримують тиск у тепломережі, – мережевими насосами, пароводяні теплообмінники підігріву мережної води – мережевими підігрівачами, вода, яку подають у трубопроводах, – прямою мережною водою. Трубопроводи, які повертають охолоджену воду на ТЕЦ, називаються зворотними, а така вода – зворотною мережною водою.

Теплообмінник – технічний пристрій, в якому здійснюється теплообмін між двома середовищами, що мають різні температури. За принципом дії теплообмінники поділяються на рекуператори і регенератори. У рекуператорах рухомі тепло-

носії розділені стінкою. До цього типу належить більшість теплообмінників різних конструкцій. У регенеративних теплообмінниках гарячий і холодний теплоносії контактують з однією і тією ж поверхнею по черзі. Теплота накопичується в стінці при контакті з гарячим теплоносієм і віддається при контакті з холодним, як, наприклад, у кауперах доменних печей. Теплообмінники застосовуються в технологічних процесах нафтопереробної, нафтохімічної, хімічної, атомної, холодильної, газової та інших галузей промисловості, в енергетиці та комунальному господарстві. Від умов застосування залежить конструкція теплообмінника.

Основним елементом теплообмінника для теплофікаційних систем є пластини, виготовлені з корозійностійких сплавів товщиною 0,4-1,0 мм методом холодного штампування. У робочому положенні пластини щільно притиснуті одна до одної і утворюють щільні канали. На лицьовій стороні кожної пластини в спеціальні канавки встановлена гумова контурна прокладка, що забезпечує герметичність каналів. Два з чотирьох отворів у пластині забезпечують підведення і відведення середовища, яке гріє або нагрівається, до каналу. Два інших отвори додатково ізольовані малими контурами. Прокладки запобігають змішанню (перегіканню) середовищ, що гріє і нагрівається. Для попередження змішування середовищ в разі прориву одного з малих контурів прокладки передбачені дренажні пази.

Структурна схема теплообмінного апарату зображена на рис. 1.

Основними величинами, що впливають на контрольований технологічний параметр (кінцеву температуру холодного теплоносія  $Q_{хк}$ ) є:

$Q_{гн}$  – початкова температура гарячого теплоносія;

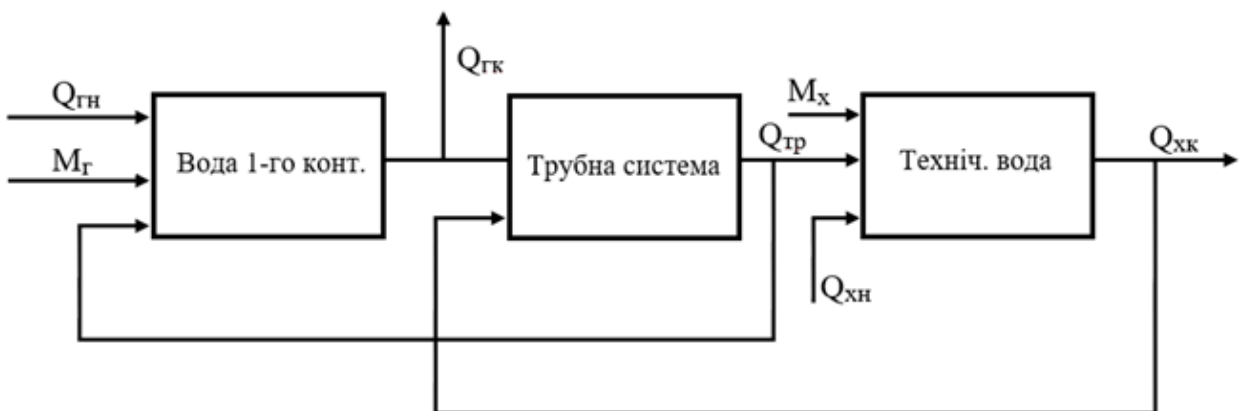


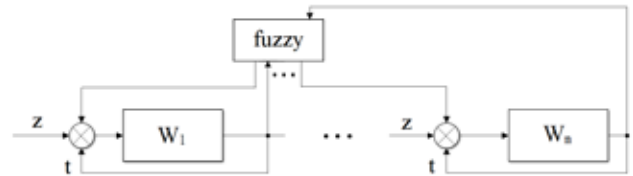
Рис. 1. Структурна схема теплообмінного апарату

$Q_{гк}$  – кінцева температура гарячого теплоносія;  
 $Q_{хн}$  – початкова температура холодного теплоносія;  
 $M_{г}$  – масова витрата гарячого теплоносія;  
 $M_{х}$  – масова витрата холодного теплоносія.

Технологічну ділянку можна представити у вигляді динамічної моделі в середовищі Simulink, що складається з послідовно розташованих чотирьох теплообмінників, вихідна температура кожного з них є вхідною температурою для наступного. Крім цього, кожен апарат має власний проміжний регулятор. Таким чином отримуємо класичну модель системи регулювання.

При надходженні досить значних зовнішніх збурень за такої структури системи регулювання для їх компенсації навантаження зміщується в сторону перших теплообмінників, у чому можна переконатися далі. Для подолання цього недоліку до схеми додається коригуючий нечіткий регулятор.

Нечіткий регулятор призначений для управління технологічними процесами. Для синтезу нечіткого регулятора пропонується методика, заснована на експертній інформації [5]. Перш ніж почати синтез нечіткого регулятора (далі – НР), необхідно розробити його концептуальні моделі для кожного виходу. Концептуальна модель відображає вплив вхідних сигналів (температури води на вході до теплообмінника) на результат роботи нечіткого регулятора – значення його виходу. Вказуються тільки ті входи НР, які повинні впливати на його вихід.

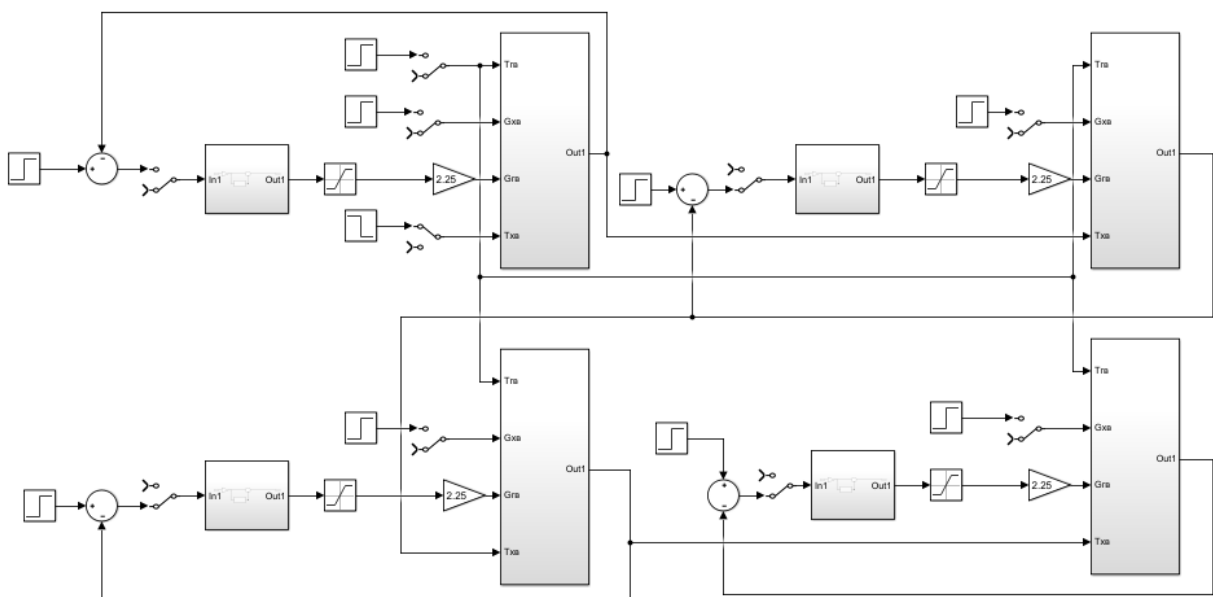


**Рис. 3. Структурна схема АСР із нечітким регулятором**

$W_{i,n}(s)$  – передатна функція підігрівача;  
 fuzzy – нечіткий регулятор;  
 $z$  – завдання для локального регулятора;  
 $t$  – зворотний зв'язок за температурою.

Функції належності налаштовані таким чином, що нечіткий регулятор коригує завдання першому локальному регулятору на 75% від відхилення температури на вході першого теплообмінника від номінальної, для другого регулятора – 66% від відхилення на вході другого, для третього – 50%. Коригування завдання останньому регулятору не проводиться, тобто він повинен у будь-якому разі підтримувати задану спочатку температуру. Таке налаштування повинно бути еквівалентним розподіленню вхідного збурення по 25% на кожен регулятор. Порівняння цієї схеми регулювання з класичною дозволить перевірити правильність такого твердження.

У результаті отримана синтезована схема, зображена на рисунку 4, дозволяє здійснити коригування завдання для локальних ПІ – регуляторів, що дає змогу для рівномірного розподілення навантаження між усіма модулями. При цьому можливе більш значне відхилення температури теплоносія на виході системи, ніж у класичній схемі, тому слід бути обережним при



**Рис. 2. Класична АСР групи підігрівачів**

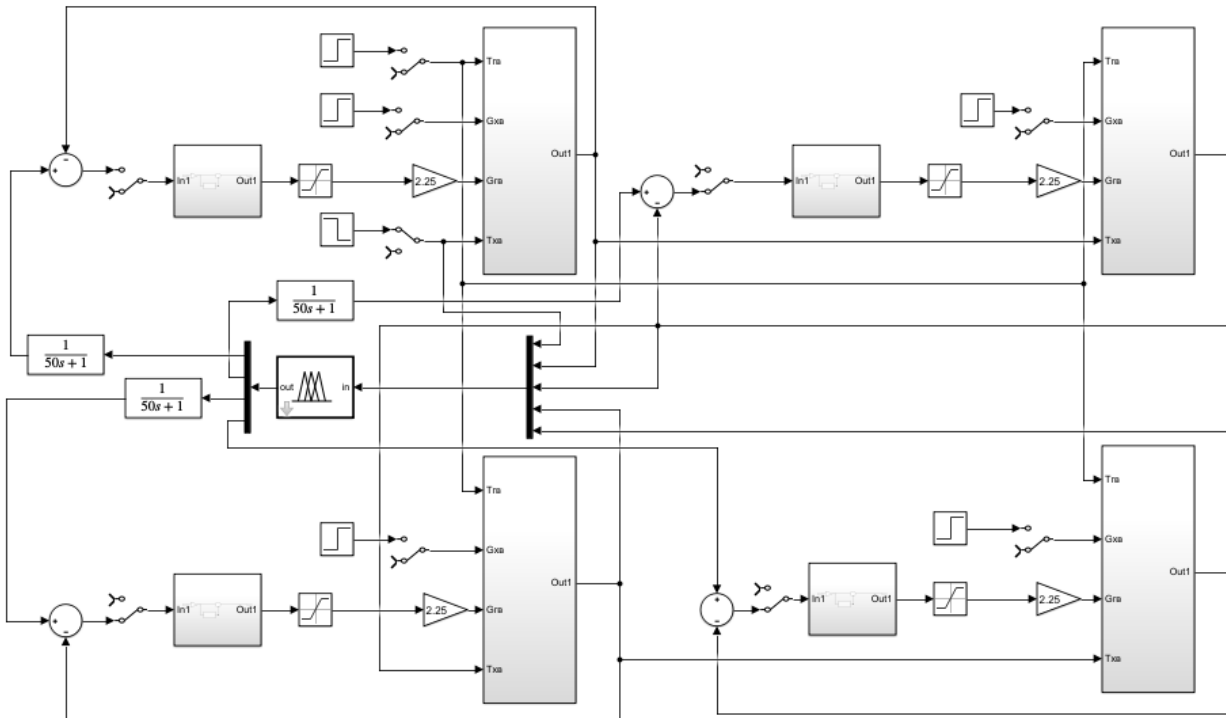


Рис. 4. Модель АСР із нечітким регулятором у середовищі Simulink

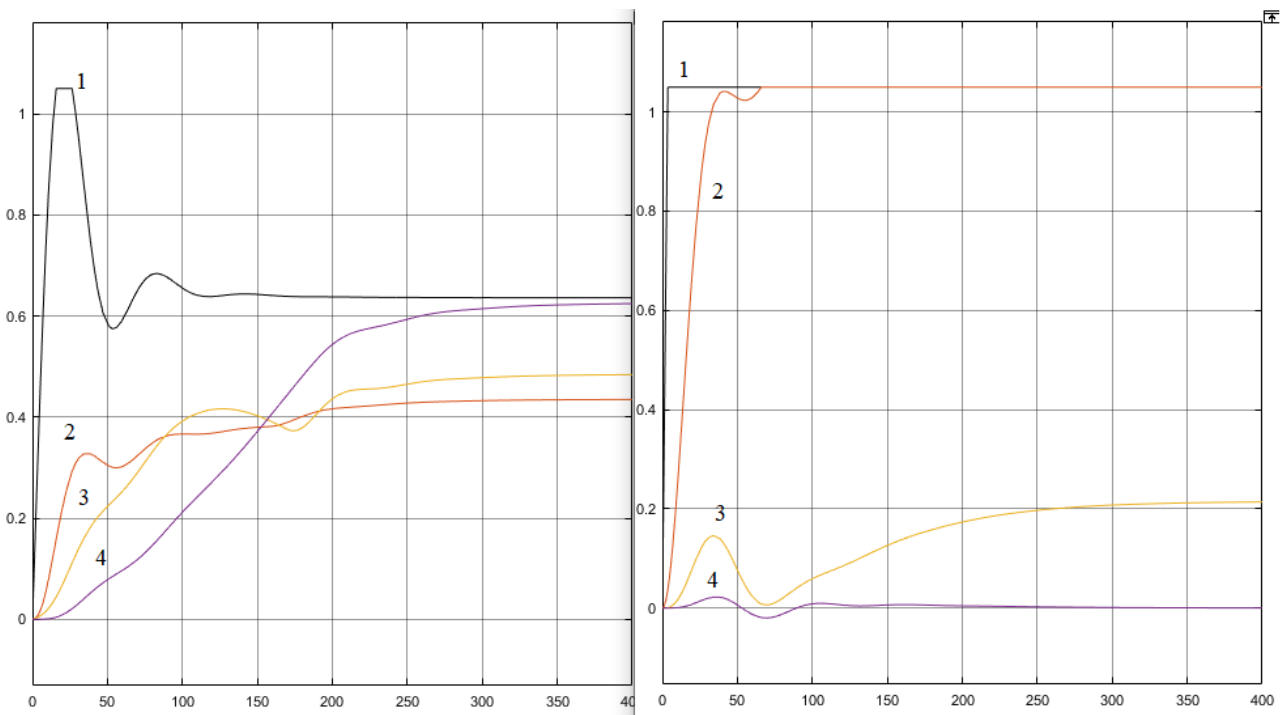


Рис. 5. Вихідний сигнал ПІ – регулятора: зліва – з нечітким регулятором, справа – без; 1, 2, 3, 4 – номери підігрівачів

налаштуванні правил нечіткої логіки та функцій належності.

Для порівняння проведемо моделювання на аналогічній схемі, але з вимкненим нечітким регулятором.

З рисунку 5 видно, що для компенсації досить великого збурення. У базовій системі регулювання перші два підігрівачі працюють на максимальній потужності (графіки 1, 2), а останні два майже не відреагували на збурення, тоді як система з нечіт-

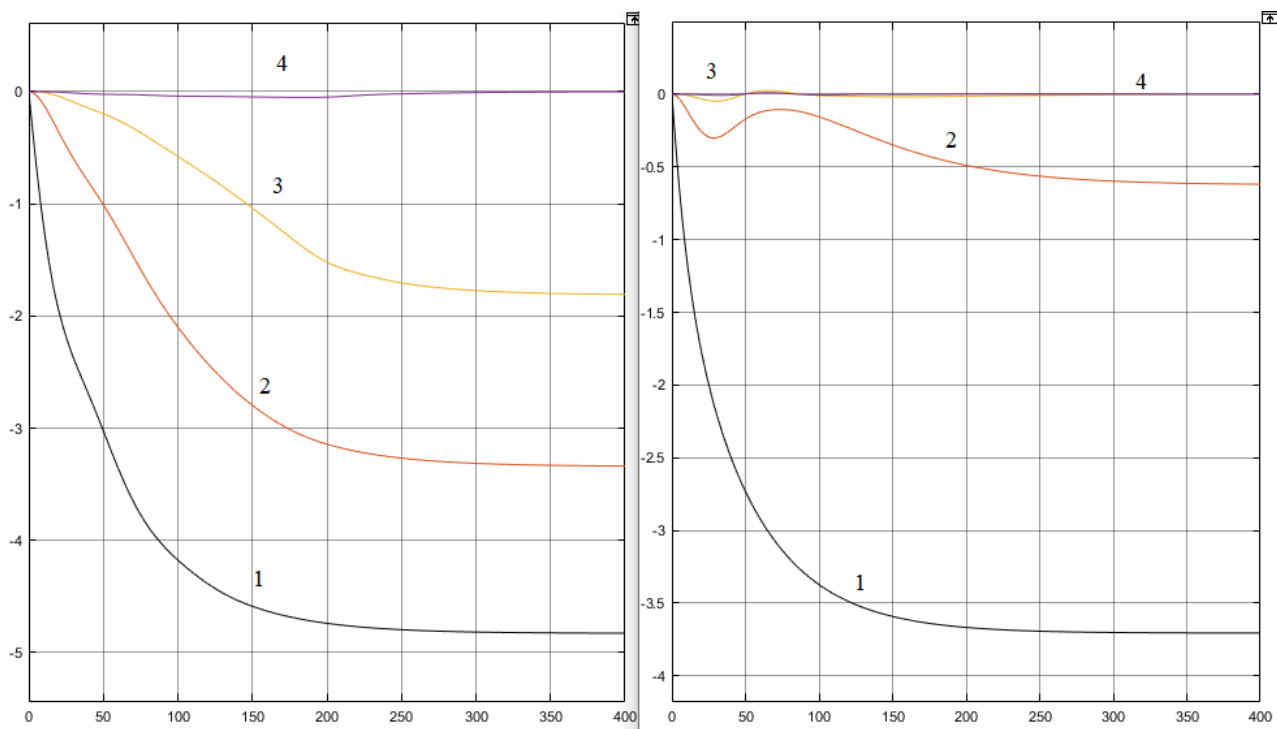


Рис. 6. Температура на виході з підігрівача: зліва – з нечітким регулятором, справа – без; 1, 2, 3, 4 – номери підігрівачів

кою логікою розподілила навантаження між усіма установками. На рисунку 3 зображені перехідні процеси регулювання температури на виході кожного підігрівача.

Попри зниження проміжних температур синтезована система показує відхилення кінцевої температури не більш ніж на 2% від величини збурення, що є більш ніж достатнім показником якості для цього технологічного процесу.

**Висновки.** Синтезована система дійсно показує розподілення навантаження між установ-

ками, хоч і дещо нерівномірне. Це пояснюється неоптимальними налаштуваннями коригуючого регулятора. Також у ній, на відміну від базової моделі, наявне відхилення кінцевої температури, але цим можна знехтувати, з огляду на його незначну величину. Попри деяку складність налаштування, можна зробити висновок про доцільність використання регуляторів із нечіткою логікою для подовження строку експлуатації теплофікаційного обладнання і підвищення надійності таких систем.

#### Список літератури:

1. К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков Теплообменники энергетических установок. Учебное электронное издание. Екатеринбург : УрФУ. 2015. 208 с.
2. Рябчиков А.Ю., Аронсон К.Э. Ремонт вертикальных сетевых подогревателей и подогревателей низкого давления паротурбинных установок : учебное пособие для вузов / под ред. Ю.М. Бродова. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 1996. 88 с.
3. Подогреватели сетевой воды в системах теплоснабжения ТЭС и АЭС : учебное пособие для вузов / Бродов Ю.М., Великович В.И., Ниренштейн М.А., Аронсон К.Э., Рябчиков А.Ю. / под ред. Ю.М. Бродова. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 1999. 138 с.
4. Теория автоматического управления. Основные положения. Примеры расчета. Учебное пособие. Изд. второе, испр. и доп. X. : Изд-во Гуманитарный центр, 2013. 544 с.
5. Гостев В.И., Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. К. : Радиоматор, 2008. 972 с.
6. Амосов О.С., Амосова Л.Н., Иванов С.Н. Синтез оптимальных систем управления электро-механическим теплогенерирующим комплексом с использованием нечетких систем. *Информатика и системы управления*. 2009. № 1(19). 83 с.
7. Кон Л.И. Методичні вказівки й таблиці для вибору налаштувань ПІ та ПІД регуляторів в одноконтурних системах регулювання теплових об'єктів із запізненням. Одеса : ОНПУ, 2003. 127 с.

8. Леоненков А.Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech. СПб. : БХВ, 2003. 720 с.
9. Мелихов А.Н. и др. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М. : Наука, 1990. 272 с.
10. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. 201 с.

**Mishchenko I.L. OPTIMIZATION OF REGULATORS OPERATION  
IN THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM BY A GROUP OF HEATERS**

*The article investigates the possibility of optimizing the structure of the control system by a group of heaters for uniform load distribution between them. Typically, the network water heating system consists of several heaters located in series, each of which is equipped with its own regulator, the task of each of them is to ensure a given temperature at the outlet of each unit.*

*The disadvantage of this system is that when there is a significant external perturbation, increase or decrease the output temperature occurs due to the first installation and only if this is not enough, the others are connected in series. Such power surges lead to accelerated and uneven wear of equipment, and prolonged operation at too high or low power adversely affects the efficiency of the installation and also accelerates wear, which in total causes significant economic damage in the future.*

*Even load distribution would make it possible to use all units in nominal or close to it mode and therefore with the optimal efficiency and operating costs. Therefore, a control system is synthesized in the work, in which the task for local PI-regulators is corrected by means of a fuzzy regulator, depending on the perturbation at the input of the system and intermediate values of temperature at the output of each heater.*

*Based on the results of comparing the quality indicators of the transient processes of regulation of the above structures, a conclusion is made about the feasibility of using the synthesized structure and its effectiveness relative to the basic system. Confirmation of this conclusion is clearly seen both on the graphs of the regulating action and on the graphs of the change in output temperature.*

**Key words:** group of network heaters, automatic control system (ACS), fuzzy logic, optimization, fuzzy controller, transient control process.

**Мошенський А.О.**

[orcid.org/0000-0002-4584-4958](https://orcid.org/0000-0002-4584-4958)

Національний університет харчових технологій

**Савченко Ю.Г.**

[orcid.org/0000-0002-1799-6700](https://orcid.org/0000-0002-1799-6700)

Національний технічний університет

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Гуйда О.Г.**

[orcid.org/0000-0002-2019-2615](https://orcid.org/0000-0002-2019-2615)

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## КОМБІНАТОРНІ ЗАСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ЧИСЛОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ

*У статті розглянуто задачу покращення параметрів і властивостей псевдовипадкових числових послідовностей (ПЧП) за рахунок комбінаторного «змішування» фрагментів вихідних послідовностей, отриманих за допомогою традиційних генераторів на основі регістрів зі зворотними зв'язками. Враховуючи, що ПЧП визначають у багатьох застосуваннях найбільш важливі параметри електронної системи, наприклад телекомунікаційної мережі загалом. У цьому випадку ефективність захисту інформаційного обміну критично залежить від властивостей ключа шифрування, яким здебільшого є ПЧП. Тому актуальність задачі не викликає сумнівів. Для її розв'язання визначені підходи для кількісної оцінки якості ПЧП.*

*Розглянуто основні методи розв'язання задачі та показано, що найбільш універсальним є підхід на основі обчислення ентропії ПЧП, тобто, по суті її випадковості (непередбачуваності) Однак точне обчислення цього показника пов'язано зі значними труднощами через необхідність врахування у більшості реальних застосувань ймовірностей (частот) усіх чисел послідовності. Можна стверджувати, що при будь-якому підході збільшення довжини ПЧП покращує її характеристики з точки зору наближення її до параметрів істинно випадкової послідовності.*

*У статті для досягнення цієї мети пропонується при генерації ПЧП використовувати кілька традиційних генераторів на регістрах зсуву зі зворотними зв'язками, а кінцеву ПЧП формувати шляхом «склеювання» фрагментів, отриманих від регістрів. Власне процедура склеювання реалізується деяким умовним «міксером» (програмним або апаратним), який по черзі зчитує фрагменти та записує їх у підсумкову ПЧП. Таку процедуру можна застосовувати багаторазово, змінюючи розміри фрагментів і стартові налаштування регістрів. Важливим є те, що при такому об'єднанні фрагментів їхні статистичні характеристики (ймовірнісний розподіл символів і груп символів) зберігаються у підсумковій ПЧП.*

**Ключові слова:** псевдовипадкова послідовність, регістр зсуву, скремблер, криптозахист.

**Постановка проблеми.** Нині процедури генерації та використання псевдовипадкових числових послідовностей (далі – ПЧП) стали де факто обов'язковим компонентом сучасних інформаційних технологій. Це можна пояснити досить широкою сферою їх застосування. Для прикладу можна назвати кілька прикладів таких сфер:

– Використання ПЧП як ключів у шифруванні та дешифруванні повідомлень у телекомунікаційних системах.

– Застосування ПЧП як тестових сигналів для контролю та діагностування технічного стану

цифрової апаратури у сигнатурних методах технічного обслуговування.

– Моделювання дестабілізуючих впливів довкілля або інших випадкових факторів на технічні об'єкти при їх випробуваннях.

Це лише кілька характерних прикладів, але вони дозволяють визначити вимоги до ПЧП з точки зору їхніх властивостей і характеристик, які бажано забезпечити при генерації таких послідовностей. Перші два приклади, мабуть, є найбільш характерними і дозволяють стверджувати, що:



1. Процедура створення (генерації) ПЧП обов'язково повинна бути детермінованою, тобто такою, що багаторазове її застосування завжди дає однаковий результат. У випадку, наприклад, коли ПЧП є ключем шифрування у відправника повідомлення, точно такий же ключ повинен бути створений отримувачем повідомлення (передавання ключа по відкритому каналу виключено за визначенням).

При сигнатурному діагностуванні цифрової апаратури та ж сама вимога впливає з необхідності забезпечити повторюваність результатів діагностичного експерименту при формуванні сигнатур справного технічного стану і типових порушень працездатності.

З іншого боку ПЧП за своїми статистичними характеристиками повинна максимально наближатися до істинно випадкової послідовності чисел, тобто появи будь-яких конкретних послідовностей із заданої множини (діапазону) повинні мати однакову імовірність (бути непередбачуваними).

У третьому випадку вимога детермінованості не є обов'язковою, хоча і бажаною. Можна використати, наприклад, істинно випадкові послідовності, отримані шляхом дискретизації та оцифрування шумового складника аналогового сигналу або іншим способом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вочевидь, для цілеспрямованого пошуку оптимальних за тим чи іншим критерієм способів покращення характеристик ПЧП необхідно спиратися на кількісні показники, що характеризують міру випадковості послідовності, її наближення до ідеалу, тобто істинно випадкової послідовності чисел. Але це питання досить складне і, на думку авторів, не має однозначної відповіді. І ось чому.

Що таке істинно випадкова послідовність (далі – ІВП)? На інтуїтивному рівні – це числова послідовність чисел, вибрана з деякої скінченної множини навмання (як карта з колоди), тобто ймовірність вибрати будь-яку іншу послідовність така сама і дорівнює  $1/N$ , де  $N$  – потужність множини. З точки зору теоретико-інформаційних критеріїв ентропія відповідного джерела, яке генерує такі ІВП, має бути максимально можливою, тобто

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i = \log_2 N, \quad (1)$$

що виконується, коли  $p_i = 1/N$  для усіх  $p_i$ , де  $p_i$  – ймовірність вибору  $i$ -ої послідовності.

Але ж бінарні послідовності, що реально застосовуються, наприклад, у реальних скремблерах для захисту інформаційного обміну, мають

довжину порядку 128...512 біт, тому провести відповідний статистичний експеримент для тестування джерела, визначивши ймовірності появи кожної з  $N = 2^n$  послідовностей нереально навіть за допомогою суперкомп'ютера. Тому величину ентропії  $H = \log_2 N$  слід сприймати скоріш як деяку абстракцію подібно поняттю, наприклад, застосовуваного у фізиці терміну «абсолютно чорне тіло».

Реальні ПЧП, що застосовуються в інформаційних технологіях, далекі від ідеалу хоча б через необхідність виконувати вимогу детермінованості алгоритму їх генерації. Ця вимога, по суті, еквівалентна використанню певної конкретної закономірності для кожної без винятку генерованої послідовності. З цього випливає, що частина послідовностей довжини  $n$ , для яких означена закономірність не виконується, мають імовірність появи, що дорівнює 0. Але ж вимога рівномірного розподілу ймовірності появи кожного з чисел у послідовності не є гарантією наближення до істинно випадкової послідовності. Наприклад, звичайний двійковий лічильник, який генерує послідовність 0, 1, 2, 3, 4, ... навряд чи хто-небудь наважиться вважати генератором ПЧП, хоча кожне число на його виходах з'являється з однаковою імовірністю  $1/n$ , де  $n$  – розрядність лічильника.

Існують досить універсальні критерії «випадковості» бінарної послідовності чисел. Наприклад, А.М. Колмогоровим [1] було зроблене фундаментальне припущення: чим складніший опис числової послідовності, тим вона ближче до ІВП. Із цього постулату можна зробити висновок, що опис ІВП – це сама послідовність чисел, дійсно вибрана випадково.

Інший універсальний критерій сформульований Ендрю Яо [2]: для випадкової послідовності ймовірність появи в наступному біті 0 або 1 дорівнює  $1/2$  незалежно від того, які числа з'явилися раніше. Тому фундаментальним тестом на випадковість є тест на наступний біт: не повинно існувати поліноміального алгоритму, який на основі перших  $k$  бітів випадкової послідовності зможе передбачити  $(k+1)$ -ий біт із ймовірністю, більшою за  $1/2$ .

На практиці для визначення рівня випадковості ПЧП використовують різні статистичні тести, такі як DIEHARD або NIST [3]. У 1982 році Е. Яо довів, що генератор, який пройшов тест на «наступний біт», пройде і будь-які інші тести, виконані за поліноміальний час. Але реально при оцінці рівня випадковості конкретної послідовності чисел завжди залишається велика доля невизначеності. І ось чому.

Насамперед слід зазначити, що є принципова різниця між задачею оцінки рівня випадковості окремо взятої конкретної послідовності та оцінки «якості» відповідного генератора ПЧП загалом. У першому випадку, коли для оцінки надана лише одна послідовність чисел (фактично, це послідовність двійкових чисел), її ентропію можна виміряти на основі частоти появи (ймовірностей) окремих бітів, пар бітів (00, 01, 10, 11) трійок 000, 001, 011 ... і так далі. Вочевидь, для скінченної послідовності зі збільшенням довжини таких фрагментів ці частоти будуть зменшуватися, а для деяких фрагментів стануть дорівнювати 0. До речі, цей розподіл дає корисну інформацію для криптоаналізу [4].

Формально у другому випадку можна використати аналогічний підхід, об'єднавши («склеївши» умовно) деяку скінченну множину послідовностей. Але виникає питання щодо обґрунтованості такого переходу з точки зору коректної оцінки якості окремих послідовностей.

Хоча нині відома велика кількість тестів на випадковість, мабуть, найбільш природним і інтуїтивно зрозумілим із них залишається тест, що використовує оцінку ентропії ПЧП, тобто обчислення рівня інформаційної надлишковості. Наприклад, до ПЧП застосовують процедури архівації, а за рівнем досягнутого стиснення (компресії) оцінюють якість послідовності. Виходячи з (1), збільшивши кількість доданків у цьому співвідношенні, можна покращити й оцінку якості ПЧП. З цього випливає тривіальний висновок: чим більша довжина послідовності  $N$ , тим краще.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Наразі оприлюднена сотня (без перебільшення) наукових статей і патентів з описом способів і методів збільшення довжини ПЧП. Більшість із них ґрунтується на використанні як генераторів ПЧП регістрів зсуву зі зворотним зв'язком по модулю 2 (Linear feedback shift register-LFSR) (рис. 1).

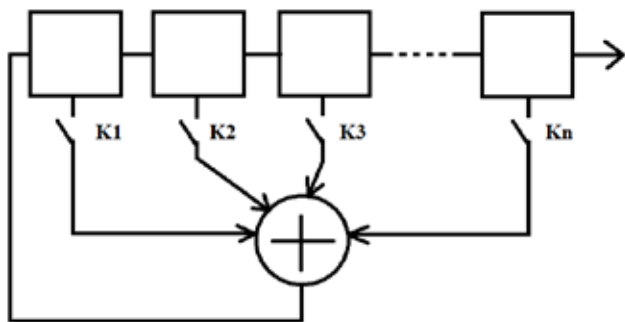


Рис. 1. Генератор на основі регістра зсуву зі зворотними зв'язками по модулю 2

На цьому рисунку наведено типову схему такого генератора. Генератори на основі LFSR без проблем реалізуються апаратно та програмно і генерують послідовності довжиною  $2^n - 1$  двійкових  $n$ -розрядних чисел без їх повторення у послідовності, що задовольняє вимоги більшості застосувань. Так, вже при помірній довжині регістру  $n = 32$  довжина генерованої послідовності складає  $N = 2^{32} - 1$  32-розрядних комбінацій, що задовольняє будь-які вимоги застосувань у скремблерах або сигнатурному діагностуванні цифрових пристроїв.

Але з точки зору вимог криптоаналізу послідовності генеровані LFSR можуть бути досить легко «зламани» у результаті так званих алгебраїчних атак [4]. Ідея такої атаки полягає в обчисленні параметрів фільтра, який її генерує. Дійсно, LFSR повністю і однозначно визначений  $n$ -коефіцієнтами примітивного поліному, що його утворює, та  $n$  розрядною стартовою комбінацією, з якої починається генерація. Не заглиблюючись в алгебраїчні деталі, можна стверджувати, що для обчислення коефіцієнтів полінома треба записати та розв'язати  $n$  лінійних відносно операції складання по модулю 2 незалежних рівнянь (це необхідна умова, але не завжди достатня).

Можна також використати інший шлях: перебором можливих значень коефіцієнтів знайти такі, що відповідають значенням заданої числової послідовності. До речі, перебір може бути відносно невеликим, якщо перебирати лише серед коефіцієнтів примітивних поліномів заданого ступеня (за приблизною оцінкою таких поліномів). Саме ці обставини є головною вадою при використанні L як генераторів ПЧП.

Суттєвого збільшення довжини послідовності можна досягти [5], застосувавши процедуру, за якої після закінчення періоду генерації для одного примітивного полінома у роботу системи включався б інший. Таким чином для системи певної розрядності період генерації збільшувався б удвічі. Отже, можливо створювати системи, в яких період генерації залежав би тільки від кількості примітивних поліномів. Але таке вдосконалення не вирішує проблеми захисту від алгебраїчної атаки загалом, хоча і збільшує трудомісткість криптоаналізу.

Для подальшого вдосконалення процедури генерації пропонується підхід, коли в схемі використовується кілька регістрів (мінімум два), а для ускладнення криптоаналізу формування ПЧП здійснюється шляхом об'єднання окремих фрагментів різних послідовностей, що генеруються

різними регістрами. Для цього використовується перемикач виходів регістрів (рис. 2), який за певною програмою вибирає фрагменти числових послідовностей із кожного з регістрів, формуючи таким чином результуючу ПЧП. Наприклад, якщо використовується два регістра R1 та R2, які генерують відповідно числа  $a_1, a_2, a_3, \dots$  та  $v_1, v_2, v_3, \dots$ , то перемикач за відповідною програмою може сформулювати такі варіанти ПЧП:

$a_1, v_1, a_2, v_2, a_3, v_3 \dots$ ;  
 $a_1, v_2, v_3, a_2, v_4, v_5 \dots$ ;  
 $a_1, v_3, a_3, v_5, a_5, v_7 \dots$ ;  
 .....

Очевидно, що комбінаторне різноманіття таких варіантів практично нескінченне, що дозволяє не лише суттєво збільшувати за своїм бажанням довжину ПЧП, а й ставить під сумнів успішність алгебраїчних атак. Принаймні трудомісткість таких процедур збільшується багаторазово.

Визначимо, наскільки зростає кількість можливих варіантів генерованих ПЧБ при застосуванні запропонованого підходу. Так, нехай на входи умовного «міксеру» надходять фрагменти окремих ПЧД із  $m$  регістрів і кожен регістр задає (вносить) у підсумкову ПВП фрагмент у середньому

довжиною  $s$  байтів. Тоді підсумкова послідовність буде довшою мінімум у  $m$  разів.

Власне процедура утворення підсумкової ПЧП реалізується деяким умовним «міксером» (апаратним або програмним), який по черзі зчитує фрагменти із  $m$  регістрів і записує їх у підсумкову ПЧП. Таку процедуру можна застосовувати багаторазово, змінюючи розмір фрагментів. При цьому кожного разу відбувається відповідне збільшення довжини послідовності. Важливо також, що при об'єднанні фрагментів їхні статистичні характеристики (ймовірнісний розподіл символів і груп символів) зберігається у підсумковій ПЧП.

**Висновки.** Таким чином, запропонована інформаційна технологія є, по суті, засобом формування та керування параметрами ПЧД. Зокрема, технологія дозволяє:

- 1) змінювати в широкому діапазоні довжину ПЧП залежно від вимог застосування;
- 2) регулювати склад і довжину фрагментів підсумкової ПЧП.

Важливо також, що параметри формування ПЧП можна оперативно змінювати, наприклад, для кожного сеансу інформаційного обміну, що збільшує ефективність захисту.

#### Список літератури:

1. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия «количество информации». *Проблемы передачи информации*, 1964, Т. 1(1). С. 3–11.
2. Statistical Testing of Random Number Generators / Proceedings of the 22-nd National Information Systems Security Conference, 10/99.
3. Потий А., Орлова С. Статистическое тестирование генераторов случайных и псевдослучайных чисел с использованием набора статистических тестов NIST STS. / А. Потий, С. Орлова. Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні. 2001, вип. 2. С. 206–214.
4. Савченко Ю.Г., Малогулко Р.В. Вдосконалення генераторів ПВП та їх застосування в системах скремблер-дескремблер телекомунікаційних пристроїв. *Наукові записки УНДІЗ*, № 6(8), 2008.
5. Пометун С.О. Алгебраїчні атаки на потокові шифратори як узагальнення кореляційних атак. *Системні дослідження та інформаційні технології*, № 2, 2008. С. 29–40.

#### Moshenskyi A.O., Savchenko Yu.H., Huida O.H. COMBINATORIAL MEANS OF IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF PSEUDO-RANDOM NUMERICAL SEQUENCES

*The article considers the problem of improving the parameters and properties of pseudo-random numerical sequences (PRS) by combinatorially “mixing” fragments of the original sequences obtained using traditional generators based on feedback registers. Given that PRSs determine in many applications the most important parameters of the electronic system, such as the telecommunications network as a whole. In this case, the effectiveness of information exchange protection is critically dependent on the properties of the encryption key, which is mostly PRS.*

*Therefore, the relevance of the problem is not in doubt. To address this, approaches have been identified to quantify the quality of PRSs. The main methods of solving the problem are considered and it is shown that the most universal approach is based on the calculation of the entropy of PRS, ie, essentially its randomness (unpredictability frequencies) of all sequence numbers. It can be argued that in any approach, increasing the length of the PRS improves its shape by characteristics in terms of approaching it to the parameters of a truly random sequence.*

*In the article to achieve this goal it is proposed to use several traditional generators on shift registers with feedback, and the final PRS to form by “gluing” the fragments obtained from the registers. Actually, the*

*gluing procedure is implemented by some conditional “mixe” (software or hardware), which in turn reads the fragments and writes them to the final PRS. This procedure can be applied repeatedly by resizing fragments and starting register settings. Importantly, with such a combination of fragments, their statistical characteristics (probabilistic distribution of symbols and groups of symbols) are stored in the final PRS.*

**Key words:** *pseudo-random sequence, shift register, scrambler, cryptosecurity.*

**Пелюх П.О.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС ІЗ РЕАКТОРОМ ВВЕР-1000 В РЕЖИМІ ПІДТРИМКИ ТИСКУ ПАРИ У ДРУГОМУ КОНТУРІ

*Стаття присвячена розробленню і дослідженню функціональної схеми автоматизації регулювання потужності енергоблоку АЕС із реактором ВВЕР-1000 в режимі підтримки тиску пари у другому контурі (режим Т).*

*Сьогодні всі українські АЕС із ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні. Це насамперед пов'язано з тим, що нині маневрування потужністю реакторної установки (РУ) здійснюється операторами в ручному режимі і тільки на вимогу диспетчерів енергосистеми. Отже, основним завданням регулювання паросилової установки є підтримка рівності між кількістю виробленої і споживаної енергії. Для двокоонтурної АЕС невідповідність між вироблюючою енергією в реакторі і споживаною в турбіні може проявлятися зі зміною тиску і температури теплоносія в першому контурі і тиску (температури) насиченої пари в другому контурі.*

*За усунення вказаної невідповідності відповідає автоматичний регулятор потужності енергоблоку, який, маючи декілька режимів роботи, може надавати керуючий вплив або на органи рулювання системи управління та захисту реактора, або на турбіну. Тож за допомогою АРП відбувається стабілізація параметру на заданому рівні і підтримка економічності енергоблоку.*

*Запорукою надійної та безпечної експлуатації енергоблоку є стійкість реактора при збуреннях як під час роботи на постійному рівні навантаження, так і в маневреному режимі. Кількісною мірою стійкості реактора є аксіальний офсет (АО) – технологічна характеристика рівномірності енерговиділення, тому мірою ефективності експлуатації енергоблоку з ВВЕР-1000 є мінімізація відхилення АО.*

*У результаті досліджено функціональну схему автоматизації регулювання потужності енергоблоку АЕС із реактором ВВЕР-1000 в режимі підтримки тиску пари в другому контурі (режим Т).*

**Ключові слова:** регулятор, енергоблок, програма регулювання, автоматизована система регулювання, автоматичний регулятор потужності, навантаження, функціональна схема автоматизації.

**Постановка проблеми.** Запорукою надійної експлуатації енергоблоку є його невідомна робота під час різних збурень. Таким чином, стаття присвячена розробленню і дослідженню функціональної схеми автоматизації регулювання потужності енергоблоку АЕС у режимі підтримки тиску пари, а також вибору комплексу технічних засобів, що відповідають основним вимогам роботи і є безпечними, надійними і легко замінними у разі виявлення неполадок у роботі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У [2, с. 99–106] було досліджено математичну модель енергоблоку ВВЕР-1000 за компромісно-комбінованою програмою регулювання з погляду розподілу значень найважливіших технологічних параметрів по висоті активної зони (АКЗ) реактора.

Робота [3, с. 171–174] присвячена дослідженню автоматичної системи регулювання потужності енергоблоку в режимі Т. Так, у роботі було розроблено систему регулювання потужності енер-

гоблоку з постійною підтримкою тиску пари в головному паровому колекторі, що дає змогу експлуатувати енергоблок у маневрених режимах.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення і дослідження функціональної схеми автоматизації регулювання потужності енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 в режимі підтримки тиску пари у другому контурі (режим Т).

**Виклад основного матеріалу.** Енергоблок із реактором ВВЕР-1000 – самостійна частина атомної електростанції. Реактор ВВЕР-1000 призначений для здійснення керованої ланцюгової реакції, яка сама підтримується шляхом поділу ядер палива з метою вироблення теплової енергії.

У статті розглядається регулювання потужності енергоблоку за підтримки тиску у другому контурі на заданому рівні, функцію регулятора виконує автоматичний регулятор потужності (АРП). Регулюючий пристрій призначений для підтримки потужності реактора відповідно до потужності турбогенератора, стабілізації ней-

тронної потужності реактора на заданому рівні і підтримки потужності турбогенератора відповідно до потужності реактора.

Для виконання основних функцій у комплект АРП входять два регулятори: регулятор реактора за теплотехнічним параметром (РРТ) і регулятор реактора за нейтронною потужністю (РРН), кожен з яких складається із трьох незалежних каналів. Для підвищення надійності та завадостійкості вихідний сигнал кожного регулятора формується за мажоритарним принципом «два з трьох», тобто вплив від регулятора передається на органи регулювання (ОР) системи управління та захисту реактора (СУЗ) тільки в тому разі, якщо принаймні два канали з трьох видадуть сигнал на переміщення ОР СУЗ у цьому напрямі.

Регулятор реактора по теплотехнічному параметру РРТ призначений для стабілізації теплотехнічного параметра (тиск пари перед турбіною) на заданому рівні зі статичної точністю  $\pm 0,5$  кгс/см<sup>2</sup> шляхом впливу на потужність реактора переміщенням ОР (режим «Т»). Оскільки основною причиною зміни тиску пари перед турбіною є коливання потужності, цей регулятор підтримує теплову потужність реактора відповідно до необхідної потужності турбіни.

На рис. 1 зображено спрощену теплову схему енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000.

Нечіткий регулятор призначений для управління технологічними процесами. Для синтезу нечіткого регулятора пропонується методика, заснована на експертній інформації. Перш ніж

почати синтез нечіткого регулятора, необхідно розробити його концептуальні моделі. Використання нечіткої логіки у проектуванні регуляторів дає змогу підвищити їх «інтелект» та можливість навчатися.

Функціональна схема системи автоматичного управління на базі нечіткої логіки (системи управління з нечітким регулятором або системи фаззи-управління) наведена на рис. 2. Схема складається з пристрою порівняння, нечіткого регулятора НР, об'єкта управління ОУ і ланцюга зворотного зв'язку. Нечіткий регулятор (фаззи-регулятор, fuzzy-controller) включає три основні блоки – блок фазифікації (fuzzyfication), блок формування логічного рішення (inference) і блок дефазифікації (de-fuzzy fication).

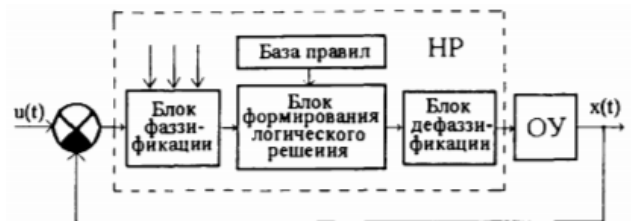


Рис. 2. Система управління з нечітким регулятором

На рис. 3 зображено структурну схему математичної моделі ММ автоматизованої системи регулювання потужності енергоблоку АЕС у режимі Т з нечітким регулятором у середовищі Simulink. У результаті отримана схема дає змогу здійснити коригування завдання для ПП- регуляторів.

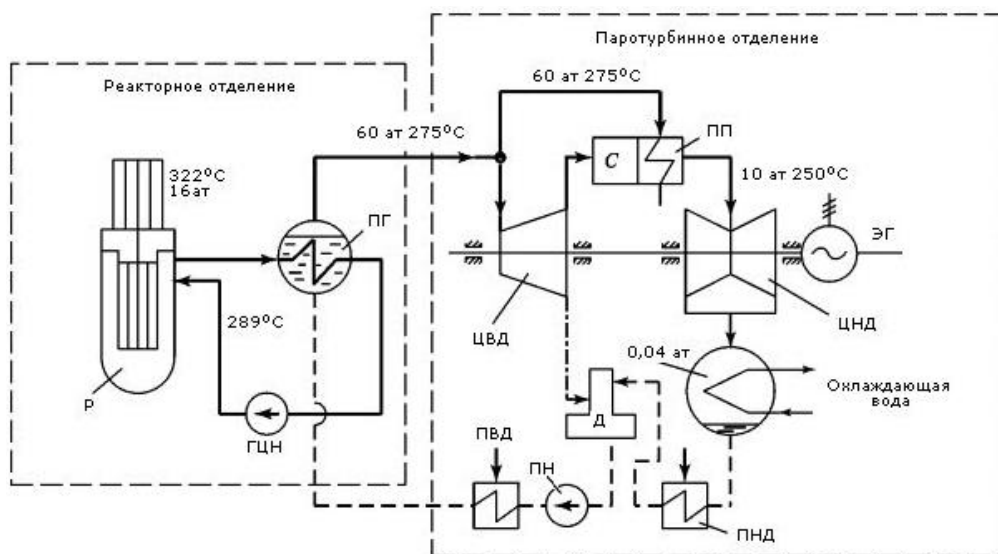


Рис. 1. Спрощена теплова схема енергоблоку АЕС із реактором ВВЕР-1000: Р – реактор; ПГ – парогенератор; ГЦН – головний циркуляційний насос; ЦВД – циліндр високого тиску; ЦНД – циліндр низького тиску; ЭГ – електрогенератор; ПНД – підігрівач низького тиску; Д – деаератор; ПВД – підігрівач високого тиску

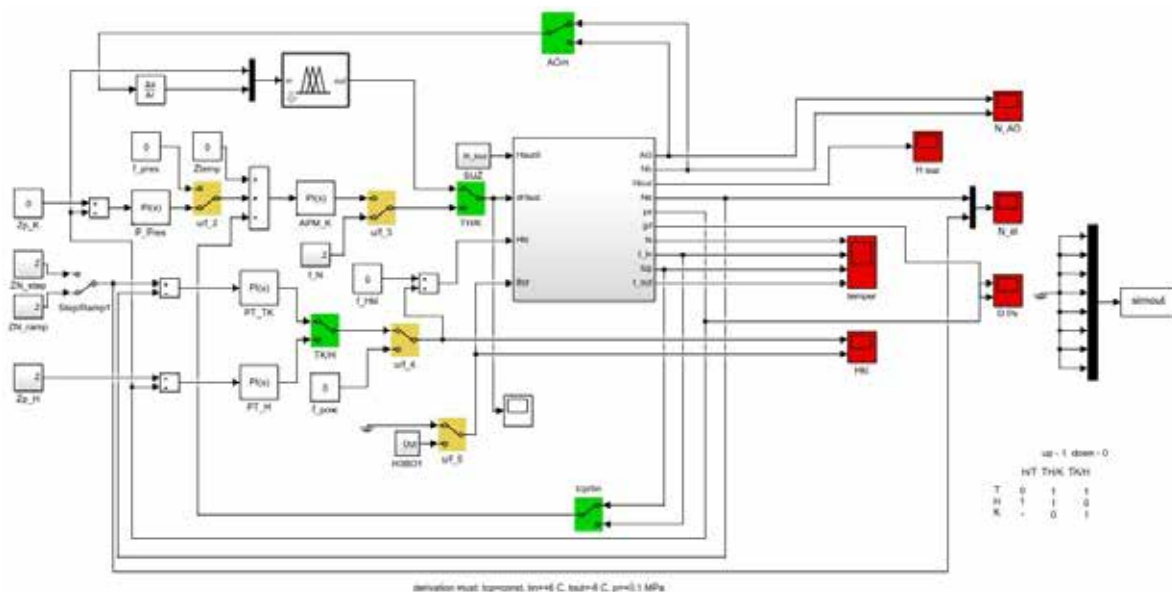


Рис. 3. Структурна схема ММ у середовищі Simulink із нечітким регулятором

Функціональні схеми автоматизації є основним проектним документом, що визначає структуру і рівень автоматизації технологічного процесу проєктованого об'єкта й оснащення його приладами та засобами автоматизації (в тому числі засобами обчислювальної техніки). Функціональні схеми являють собою креслення, які показують технологічне обладнання, комунікації, органи управління, прилади та засоби автоматизації, обчислювальної техніки та інші агрегатні комплекси із зазначенням зв'язків між приладами і засобами автоматизації.

На рис. 4 зображено розроблену функціональну схему автоматизації регулювання потужності енергоблоку АЕС із реактором ВВЕР-1000 у режимі підтримки тиску пари в другому контурі (режим Т).

Запропонована функціональна схема автоматизації регулювання потужності енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 у режимі підтримки тиску пари у другому контурі (режим Т) включає таке технологічне обладнання, органи управління, прилади та засоби автоматизації:

1) Для вимірювання температури був вибраний термоперетворювач опору платиновий НСХ 100П (див. елемент 5,7 на рис. 4), призначений для вимірювання температури поверхні твердих тіл і підшипників, газоподібних і рідких неагресивних і агресивних середовищ, матеріали захисної арматури, які не розрушають.

2) Нормуючий перетворювач НП-02 (див. елемент 14,15 на рис. 4) призначений для роботи з перетворювачами термоелектричними типу ТХА і ТХК, а також із термоперетворювачами опору типу ТСМ і ТСП. НП-02 здійснює перетворення

і лінеаризацію вхідних сигналів в уніфіковані вихідні сигнали.

3) Цифровий дванадцятиканальний паперовий реєстратор Технограф-160 (див. елемент 21, 22, 23 на рис. 4), який є реєструючим приладом, призначений для вимірювання та реєстрації по дванадцяти незалежних каналах (К1–К9, КА, КВ, КС) напруги і сили постійного струму, а також неелектричних величин, перетворених в електричні сигнали постійного струму або активний опір; також він призначений для візуального контролю, реєстрації, сигналізації і позиційного регулювання параметрів технологічних процесів (температури, тиску, витрати, вологості тощо). Самописець – реєстратор Технограф-160 – у всіх виконаннях має інтерфейс RS485 для зв'язку з персональним комп'ютером.

4) Тахометр електронний ТЕ-6К-ТК (див. елемент 17, 18 на рис. 4) призначений для безперервного вимірювання й індикації частоти обертання роторів турбін або валів будь-яких механізмів.

5) Виконавчий механізм для органів СУЗ (див. елемент 2 на рис. 4). Кроковий електромагнітний привід СУЗ разом із поглинаючими стрижнями (ПС), які є робочим органом системи управління і захисту, є виконавчим механізмом. Привід СУЗ призначений для переміщення ПС СУЗ, фіксації його в крайніх і проміжних положеннях, видачі інформації за допомогою датчика про становище ПС СУЗ.

Також привід СУЗ призначений для скидання ПС СУЗ в режимі аварійного захисту. За допомогою приводу здійснюється пуск, регулювання потужності і зупинка реактора шляхом введення в активну зону або виведення з неї ПС СУЗ, а також



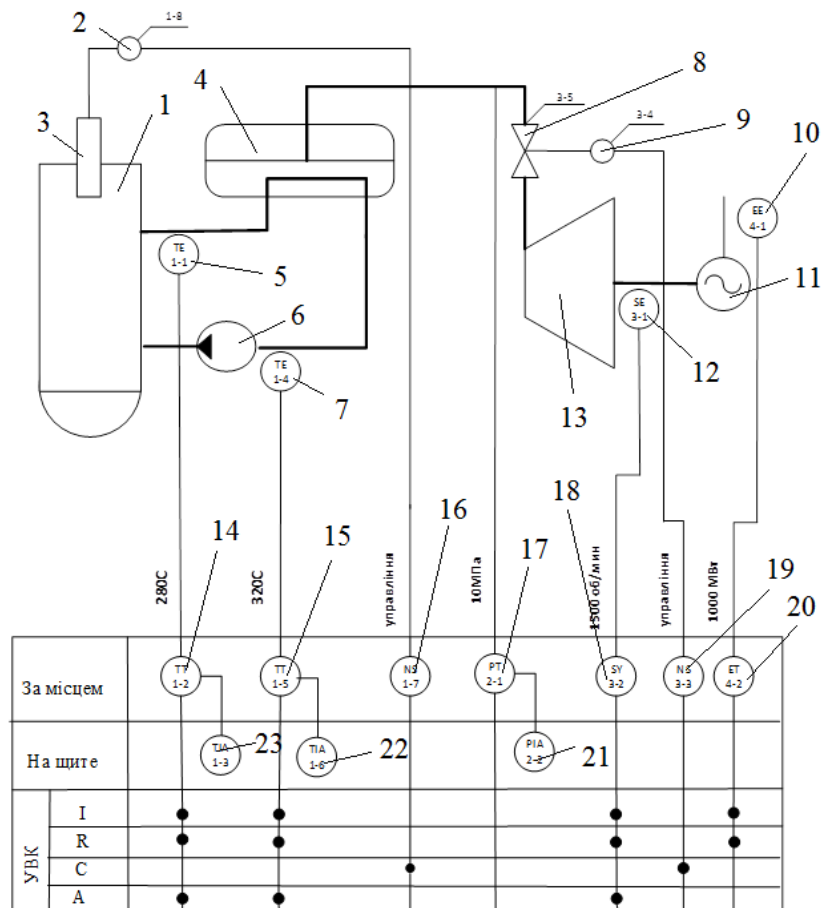


Рис. 4. Функціональна схема автоматизації регулювання потужності енергоблока в режимі Т

аварійна зупинка реактора шляхом скидання ПС СУЗ при знеструмленні приводу. Привід СУЗ є електромагнітним приводом зі зворотно-поступальним рухом якоря, розрахований на тривалу роботу в воді першого контуру під тиском.

6) Первинний перетворювач тиску серії Метран-22-АС-1 (див. елемент 17 на рис. 4) призначений для безперервного перетворення значення вимірюваного параметра (абсолютного, надлишкового тиску, розрідження, тиску розрідження, різниці тисків) в уніфікований струмовий сигнал у системах автоматичного управління, контролю і регулювання технологічних процесів на об'єктах атомної енергетики.

7) Первинний перетворювач кутової швидкості ротора (див. елемент 17 на рис. 4) призначений для перетворення частоти обертання турбіни в частоту синусоїдального сигналу. Первинний перетворювач кутової швидкості ротора являє собою безконтактний електромагнітний пристрій, який складається з двохполюсного статора і складової шестерні.

Принцип роботи первинного перетворювача кутової швидкості такий. Під час обертання

ротора відбувається перерозподіл магнітного потоку магніту в магнітопроводі, що пов'язано з періодичною зміною магнітної провідності робочих повітряних зазорів, які утворені полюсами. Внаслідок цього в котушках індексується ЕРС, частота якої пропорційна кутовій швидкості обертання ротора. Діючі значення ЕРС у правій і лівій котушках рівні між собою, а фази перших гармонік ЕРС відрізняються на половину періоду основної гармоніки. При зустрічному включенні правої і лівої котушок ЕРС, що наводяться в них, алгебраїчно підсумовуються. При цьому непарні гармоніки складаються, а парні віднімаються, що дає можливість отримати менш спотворену форму вихідного сигналу.

**Висновки.** У роботі розглянуто роботу автоматизованої системи на базі нечіткої логіки, а також розроблено і досліджено функціональну схему автоматизації регулювання потужності енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 в режимі підтримки тиску пари у другому контурі. Також для розробленої схеми було вибрано комплекс технічних засобів, головними достоїнствами яких є безпека, надійність і економічність експлуатації.



Список літератури:

1. Фощ Т.В. Аналіз впливу методів управління потужністю енергоблоку з водо-водяним реактором на осьової офсет / Т.В. Фощ, М.В. Максимов, М. В. Нікольський. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. № 2 (8). С. 19–27.
2. Максимов М.В., Беглов К.В., Цисельська Т.А. Модель реакторної установки енергоблоку з ВВЕР-1000 як об'єкта керування потужністю / Праці Одеського політехнічного університету. 2012. № 1. С. 99–106.
3. Кисельова Н.І., Погрібний Я.С., Беглов К.В. Розробка автоматичної системи регулювання потужності енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000 в режимі Т. Вчені записки «Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського». Серія «Технічні науки», 2018. Вип. 29(68). Ч. 1. № 3. С. 171–174.
4. Пелюх П.О. Автоматизована система регулювання потужності енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000 в режимі підтримки тиску пари у другому контурі. Вчені записки «Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського». Серія «Технічні науки», 2019. Вип. 30 (69). Ч. 1. № 6. С. 138–142.
5. Сучасні технології управління: в 2 т. Монографія / під заг. ред. С.В. Купрієнко; Sworld. Одеса: Купрієнко С.В., 2012. 179 с.
6. Гостев В.І., Нечіткі регулятори в системах автоматичного управління. К.: Радіоматор, 2008. – 972 с.

**Peliukh P.O. FUNCTIONAL SCHEME OF AUTOMATED SYSTEM OF REGULATION OF POWER OF NPP WITH VVER-1000 REACTOR IN THE MODE OF STEAM PRESSURE SUPPORT IN THE SECOND CIRCUIT**

*The article is devoted to the development and research of the functional scheme of power control automation of the NPP power unit with VVER–1000 reactor in the mode of maintaining the steam pressure in the second circuit (mode T).*

*Today, all Ukrainian NPPs with VVER-1000 are operated in the mode of stabilization of the power unit at a given level. This is primarily due to the fact that currently maneuvering the power of the reactor unit (RU) is carried out by operators manually and only at the request of power system managers. Therefore, the main task of regulating the steam power plant is to maintain equality between the amount of energy produced and consumed. For a double-circuit NPP, the mismatch between the energy produced in the reactor and consumed in the turbine can manifest itself with a change in the pressure and temperature of the coolant in the first circuit and the pressure (temperature) of saturated steam in the second circuit.*

*The elimination of this discrepancy is the responsibility of the automatic power regulator of the power unit, which, having several operating modes, can have a controlling influence either on the controls of the control and protection system of the reactor, or on the turbine. Therefore, with the help of ARP there is a stabilization of the parameter at a given level and maintaining the efficiency of the unit.*

*The key to reliable and safe operation of the power unit is the resistance of the reactor to disturbances both during operation at a constant load level and in shunting mode. The quantitative measure of the stability of the reactor is the axial offset (AO) – a technological characteristic of the uniformity of energy release, so a measure of the efficiency of operation of the power unit with VVER-1000 is to minimize the deviation of the AO.*

*As a result, the functional scheme of automation of power control of the NPP unit with the VVER-1000 reactor in the mode of maintaining the steam pressure in the second circuit (mode T) is investigated.*

**Key words:** *regulator, power unit, control program, automated control system, automatic power regulator, load, functional scheme of automation.*

**Підопригора Ю.А.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## БАГАТОДІАПАЗОННІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ЯК ОСНОВА ТОЧНОСТІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

*Проведено дослідження багатодіапазонних оптико-електронних систем як основи точності геометричних вимірювань. Підкреслено, що одним із перспективних напрямів розвитку технології і техніки є автоматизація робіт із застосуванням сучасних засобів контролю, що дає змогу підвищити продуктивність обладнання, заощадити ресурси і скоротити частку ручної праці. Зазначється, що за структурною складовою частиною багатодіапазонні оптико-електронні системи мають кілька інформаційних каналів, які з'єднані між собою і всією системою в сукупності. Визначено два види оптико-електронних систем: активну і пасивну. Описано структуру найпростішої системи та наведено вимірювальну схему внутрішньо-основної оптико-електронної системи. На основі схеми математично обґрунтовано принципи визначення енергетичного центру, координат зображень та відокремлено систему координат багатодіапазонних оптико-електронних систем. Обґрунтовано застосування волоконно-оптичних датчиків частотного типу та відокремлено два види датчиків деформації: розподілені на основі ефекту розсіювання Мандельштама – Бріллюена; квазі-розподілені на основі ефекту резонансного віддзеркалення від волоконно-оптичних брегівських решіток. Описано переваги кожного з них та на основі проведеного аналізу запропоновано методику розрахунку потенційно досяжних метрологічних характеристик для основних методів мультиплексування і реєстрації сигналу, яка базується на спектральному аналізі. Підкреслено, що метод на основі спектрального мультиплексування із застосуванням скануючого інтерферометра Фабрі-Перо є найбільш ефективним та затребуваним. Наведено структурну схему методу та описано взаємодію всіх компонентів. Зазначається, що проблемою цього методу реєстрації є використання в'єзокерамічний привід, який володіє порівняно високою нелінійністю, саме тому потрібно застосування методу калібрування.*

**Ключові слова:** багатодіапазонні оптоелектронні системи, вимірювання, геометричні параметри, точність, спектр, інформаційний канал.

**Постановка проблеми.** Багатодіапазонні оптико-електронні системи (ОЕС) – це системи, що працюють одночасно у двох або більше оптичних спектральних діапазонах. Нині вони є доволі поширеними у різних сферах науки і техніки [1]. Такі системи успішно використовуються для виявлення різних об'єктів (цілей) у військовій техніці, для моніторингу екологічного стану і контролю навколишнього середовища, на промислових виробництвах, у правоохоронній та охоронній апаратурі тощо. Оскільки проведення натурних випробувань дуже часто пов'язане з великими техніко-економічними і часовими витратами, роль комп'ютерного моделювання в процесі синтезу і аналізу ОЕС, особливо на перших етапах проектування, важко переоцінити. Одним із перспективних напрямів розвитку технології і техніки є автоматизація робіт із застосуванням сучасних засобів контролю, що дає змогу підвищити продуктивність обладнання, заощадити ресурси і

скоротити частку ручної праці. За структурним складником багатодіапазонні оптико-електронні системи мають кілька інформаційних каналів, які з'єднані між собою і всією системою в сукупності.

Загалом багатодіапазонні оптико-електронні системи використовують під час контролю площинності або просторового положення об'єктів щодо базової площини під час спорудження доріг, шляхопроводів, аеродромів, а також під час визначення взаємного положення елементів великогабаритних конструкцій. Такі системи створюють протяжну оптичну базову площину, щодо якої здійснюється позиціонування. Безконтактність і можливість повної автоматизації процесу контролю дають змогу створювати універсальні ОЕС і використовувати їх для вирішення таких завдань, як контроль положення робочих органів систем автоматичного управління (САУ) будівельної та сільськогосподарської техніки, позиціонування частин і блоків у процесі монтажу в промисло-

вому виробництві і суднобудуванні. Саме тому тема цієї наукової роботи є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останні кілька років чимало як зарубіжних, так і вітчизняних учених здійснили відкриття у сфері багатодіапазонних оптико-електронних систем.

М.С. Мамута [1] підійшла з технічної позиції до формування дієвої ОЕС, авторкою розроблено математичну модель двоканальної ОЕСС для дослідження процесу формування ТВ- та ТПВ-сигналів та їх комплексування з урахуванням особливостей зорового сприйняття візуальної інформації оператором. Розроблена математична модель двоканальної ОЕСС дозволяє враховувати особливості проходження сигналу в усіх ланках інформаційного комплексу «фоново-цільова обстановка (ФЦО) – двоканальна ОЕСС – оператор» та особливості процесу комплексування даних і дає змогу вибирати найкращий для даних умов функціонування метод комплексування, забезпечуючи найбільшу ефективність роботи.

Оцінку ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації запропонували В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко та М.С. Мамута [2]. Науковцями запропоновано методику оцінювання ефективності функціонування багатоканальної оптико-електронної системи спостереження (БОЕСС) із комплексуванням інформації. Вона поєднує таку споживчу характеристику ОЕСС, як імовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації, з показником якості комплексованого зображення – показником успішності виконання завдання.

В.В. Кондрат, О.І. Костенко та В.В. Куценко [3] розкрили шляхи модернізації оптико-електронних систем.

Із зарубіжних авторів варто відзначити роботи Li Shao, Yun-long Wu [4], Schioppa P., Manea A., Cristea I., Grosu N., Craciun A. I., Craciun A., & Granciu D. [5], Lee E. S., Lee D. G., Lee S. H. [6], Bushlin Y., Baum G., Engel M. Y. [7], Simmons O. D., Jayner T. W., Weppner M. B. [8], Maurer T., Driggers R. G., Vollmerhausen R., Friedman M. M. [9], McKee D. C., Simmons O. D., Makar R. J. [10], Guissin R., Lavi E., Palatnik A. [11], Franning J., Halford C., Jacobs E. [12] та інших.

Проте, враховуючи описані наукові набутки за темою, питання дослідження багатодіапазонних оптико-електронних систем як основи точності геометричних вимірювань залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Мета статті – здійснити дослідження багатодіапазонних оптико-електро-

них систем як основи точності геометричних вимірювань.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Протягом тривалого часу співіснують електронні та оптичні датчики, які застосовують електронні методи обробки інформації, оскільки оптичні сигнали чудово перетворюються в електронну, а електронні сигнали – в оптичну форму.

Як правило, оптико-електронна система із внутрішньою базою являє собою активну або пасивну оптико-електронну систему, яка працює як далекомір внутрішньої бази. Така система призначена для контролю розташування малогабаритного об'єкта в певній сфері дослідження. Найпростіший альтернативний варіант внутрішньо-основної оптико-електронної системи складається з двох цифрових відеокамер. Кожна камера включає об'єктив та візуатор області. Базова відстань між відеокамерами становить  $V = V_1 + V_2$  (рис. 1). Система координат приладу позначається як OXYZ. Вісь OY (вісь вертикальних переміщень) спрямована вгору і проходить через основні точки об'єктивів в обох відеокамерах. Вісь OZ (вісь відстані) паралельна оптичним осям об'єктивів. Вісь OX (вісь горизонтальних переміщень) спрямована вправо, якщо дивитися на систему, що знаходиться спереду.

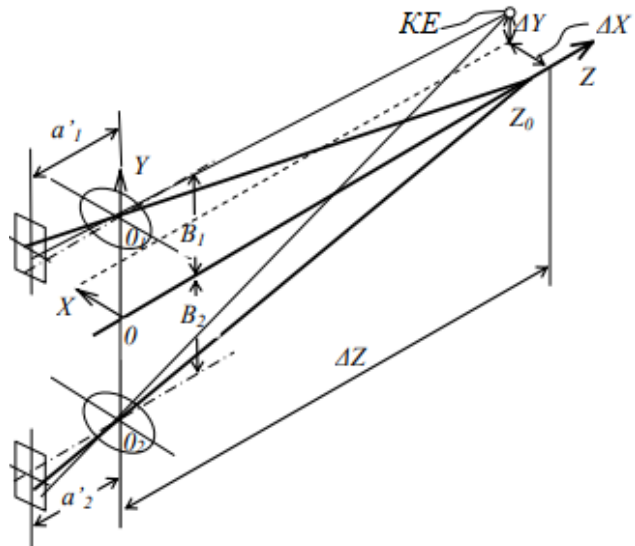


Рис. 1. Вимірювальна схема внутрішньо-основної оптико-електронної системи

У процесі вимірювань визначаються координати еталонної позначки. У разі пасивного варіанту еталонна позначка може бути представлена як світлодіод.  $V_1$  і  $V_2$  – відстані базової лінії від осі OZ до оптичних осей об'єктивів лінз  $O_1$  і  $O_2$  в мм,  $a'_1$  і  $a'_2$  – відстані від основних точок об'єктивів до лінз зображення камер у мм.

У процесі вимірювання лінзи відеокамер проєктують зображення керуючого елемента на поверхні (рис. 2).  $x'_1, x'_2$  (1) та  $y'_1, y'_2$  (2) – енергетичні центри координат зображень елемента керування для обох відеокамер.  $x'_{01}, x'_{02}$  та  $y'_{01}, y'_{02}$  – точки витоків на візуалізаторах відеокамер. Відеокамери формують два цифрових відеосигнали, які надходять до блоку обробки інформації. Потім кадри, що містять зображення елемента управління, зберігаються в основній пам'яті комп'ютера. Існує два етапи для визначення координат елемента управління відносно базової точки по вертикалі (вісь OY), поздовжній осі (вісь OZ) та горизонталі (вісь OX).

Спочатку вертикальні координати  $y'_1, y'_2$  та горизонтальні  $x'_1, x'_2$  координати елемента управління зображення енергетичних центрів обчислюються в блоці обробки (рис. 2).

Алгоритм визначення енергетичного центру є найпростішим і забезпечує точність близько 0,1–0,01 розміру пікселя [7]. Потім координати центрів зображень передаються до початкових точок у візуалізаторах області (3), де  $p_x, p_y$  – це розмір горизонтального та вертикального пікселів.

$$\begin{aligned} x'_1 &= \frac{\sum_{n=x'_{1max}-10}^{x'_{1max}+10} nU(y'_{1max}, n)}{\sum_{n=x'_{1max}-10}^{x'_{1max}+10} U(y'_{1max}, n)} \\ x'_2 &= \frac{\sum_{n=x'_{2max}-10}^{x'_{2max}+10} nU(y'_{2max}, n)}{\sum_{n=x'_{2max}-10}^{x'_{2max}+10} U(y'_{2max}, n)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y'_1 &= \frac{\sum_{n=y'_{1max}-10}^{y'_{1max}+10} nU(x'_{1max}, n)}{\sum_{n=y'_{1max}-10}^{y'_{1max}+10} U(x'_{1max}, n)} \\ y'_2 &= \frac{\sum_{n=y'_{2max}-10}^{y'_{2max}+10} nU(x'_{2max}, n)}{\sum_{n=y'_{2max}-10}^{y'_{2max}+10} U(x'_{2max}, n)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x''_1 &= (x'_1 - x'_{01}) \cdot p_x \\ x''_2 &= (x'_2 - x'_{02}) \cdot p_x \\ y''_1 &= (y'_1 - y'_{01}) \cdot p_y \\ y''_2 &= (y'_2 - y'_{02}) \cdot p_y \end{aligned} \quad (3)$$

Система координат багатодіапазонних оптикоелектронних систем має вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta X &= \frac{x'_1 \cdot \Delta Z}{a_1} \\ \Delta Y &= \frac{B_1 \left( \frac{B_2 - y''_2}{Z_0} - \frac{B_1 - y''_1}{Z_0} \right) - B_2 \left( \frac{B_1 - y''_1}{Z_0} - \frac{B_1 - y''_1}{Z_0} \right)}{\left[ \frac{1}{Z_0} (B_1 + B_2) - \left( \frac{y''_1}{a_1} + \frac{y''_2}{a_2} \right) \right]} \\ \Delta Z &= \frac{B_1 + B_2}{\left[ \frac{1}{Z_0} (B_1 + B_2) - \left( \frac{y''_1}{a_1} + \frac{y''_2}{a_2} \right) \right]} \end{aligned} \quad (4)$$

У розглянутій внутрішньо-основній оптикоелектронній системі є два фактори, які найбільше впливають на точність вимірювань. Технологічними факторами є помилки в параметрах матеріа-

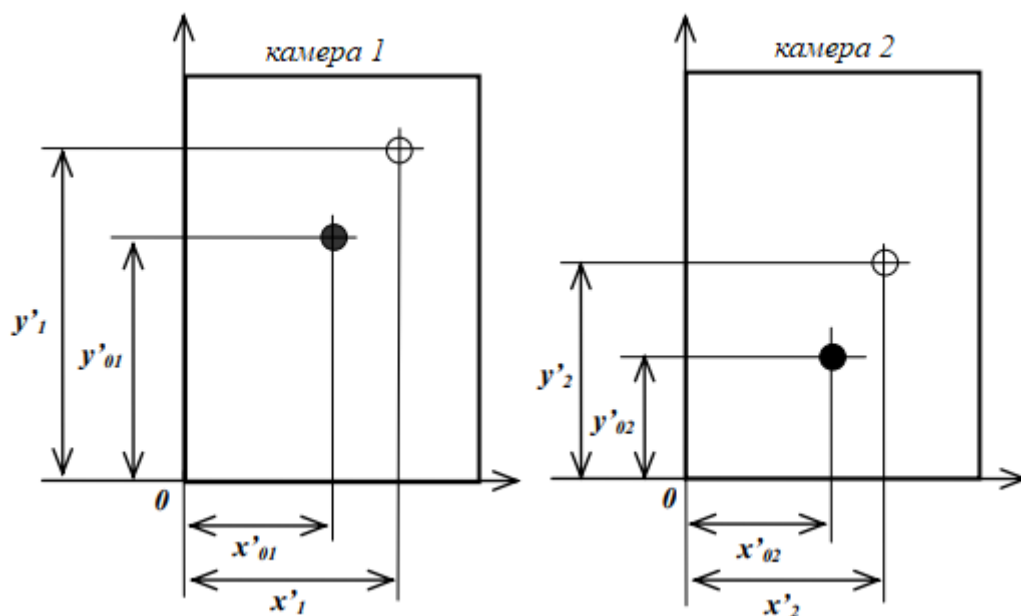


Рис. 2. Зображення площин відеокамер під час вимірювання

лів, помилки у процесі виробництва та складання деталей системи.

Оптико-електронні вимірювальні системи працюють на основі волоконно-оптичних датчиків частотного типу. Нині найбільш затребуваними є два види датчиків деформації:

- 1) розподілені на основі ефекту розсіювання Мандельштама – Бріллюена;
- 2) квазі-розподілені на основі ефекту резонансного віддзеркалення від волоконно-оптичних брегівських решіток.

Перший тип датчиків – на основі ефекту розсіювання Мандельштама-Бріллюена – вимагає тривалого часу усереднення сигналу, це відбувається у результаті малої величини інтенсивності розсіяного випромінювання; як наслідок, цей тип датчиків використовується тільки для вивчення статичних розподілів деформації.

Стосовно другого типу – на основі ефекту резонансного віддзеркалення від волоконно-оптичних брегівських решіток – варто відзначити спектральність дії та можливість їх використання для вивчення як статичних, так і динамічних деформацій. Також, відповідно до [13], механічна міцність решітки тим більша, чим менша щільність дози опромінення. За однакової щільності дози опромінення, необхідної для створення потрібного показника заломлення, міцність решітки під час запису безперервним випромінюванням у 1,5 раза більша, ніж під час запису імпульсним. Під час запису імпульсним випромінюванням міцність решітки тим більша, чим менша енергія одного імпульсу. Квазі-розподілені датчики інформації на основі ефекту резонансного віддзеркалення від

волоконно-оптичних брегівських решіток можуть використовуватися в діапазоні відносних подовжень  $-1 \dots +1\%$  протягом 25 років з імовірністю руйнування 0,1%.

Методики розрахунку потенційно досяжних метрологічних характеристик для основних методів мультиплексування і реєстрації сигналу базуються на спектральному аналізі, найбільш точним за [14] є метод на основі спектрального мультиплексування із застосуванням скануючого інтерферометра Фабрі-Перо.

Структурна схема пристрою, що реалізує описаний метод, наведена на рис. 3.

У цій схемі випромінювання від суперлюмінесцентного діода (СЛД) надходить на оптичний вентиль – пристрій, який запобігає відображенню і розсіюванню назад випромінювання в СЛД. Після проходження оптичного розгалужувача випромінювання, відбите від датчиків  $1 \dots N$ , надходить на вхід скануючого інтерферометра Фабрі-Перо. Залежно від поданої на його привід напруги змінюється спектр пропускання інтерферометра, тобто інтерферометр працює як фільтр, а випромінювання реєструється фотоприймальним пристроєм (ФПП).

Однією з проблем даного методу реєстрації є те, що використовуваний п'єзокерамічний привід володіє порівняно високою нелінійністю, яка становить 0,2.1%. У результаті при діапазоні сканування 40 нм похибка вимірювання резонансних довжин хвиль перевищить 80 ... 400 нм.

Для її зменшення потрібно застосування методу калібрування, заснованого на застосуванні реперних точок через вузькі спектральні інтервали, в межах яких похибка компенсується.

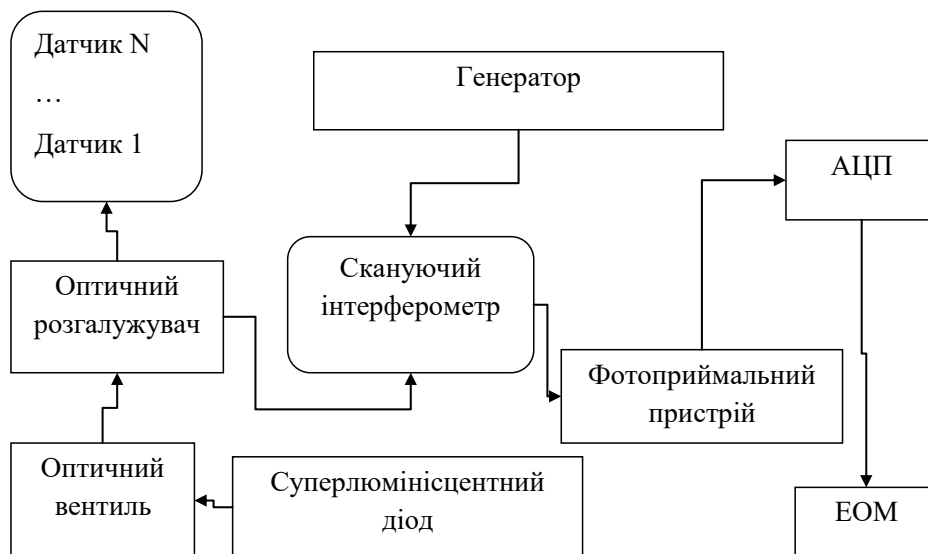


Рис. 3. Структурна схема пристрою реєстрації сигналу за допомогою скануючого інтерферометра Фабрі-Перо

**Висновки.** У роботі здійснено дослідження багатодіапазонних оптико-електронних систем як основи точності геометричних вимірювань. Застосування багатодіапазонних (багатоспектральних) оптико-електронних систем дає змогу підвищити ефективність вирішення багатьох практичних завдань, поліпшити показники якості роботи систем, наприклад збільшити швидкість прийняття рішень під час розпізнавання об'єктів,

підвищити ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації цілей.

У перспективі розвиток волоконної та інтегральної оптики значно доповнить і розширить можливості волоконно-оптичних датчиків та волоконно-оптичних вимірювальних систем, зробивши їх всеоптичними, оскільки стануть доступними потужні оптичні методи обробки інформації без оптико-електронних перетворень.

#### Список літератури:

1. Мамута М. С. Підвищення ефективності комплексування оптико-електронних систем спостереження: дис. канд. техн. наук: 05.11.07, Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". К, 2013. 203 с.
2. Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Мамута М.С. Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації. Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2012. № 6. С. 127–131.
3. Кондрат В. В., Костенко О. І., Куценко В. В. Шляхи модернізації оптико-електронних засобів розвідки та прицілювання ОБТ. *Радиотехника*. 2018. Вып. 194. С. 34–37.
4. Li Shao, Yun-long Wu. Image metric analysis of laser jamming effect based on edge strength similarity and gray mean square error. *Proc. SPIE 9686*, 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optoelectronic Materials and Devices, 96860O, 25 October 2016; doi: 10.1117/12.2243215; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2243215>
5. Schiopu P., Manea A., Cristea I., Grosu N., Craciun A. I., Craciun A., & Granciu D. Image stabilization for SWIR advanced optoelectronic device. In *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies 2014*. 2015. P. 925819-925819.
6. Lee E. S., Lee D. G., Lee S. H. Opto-mechanical design and analysis of the MSC on the KOMPSAT-2. 20th Congress of the International Commission for Optics. Changchun, China. 2005.
7. Bushlin Y., Baum G., Engel M. Y. FPA sensor performance study using computer simulation. *Proc. SPIE*. 1996. Vol. 2743. P. 252–263.
8. Simmons O. D., Jayner T. W., Weppner M. B. et al. Infrared sensor stimulator (IRSS) installation in the ACETEF, NAWC-AD. *Pros. SPIE*. 2001. Vol. 4366. P. 331–340.
9. Maurer T., Driggers R. G., Vollmerhausen R., Friedman M. M. 2002 NVTherm improvements. *Proc. SPIE*. 2002. Vol. 4719. P. 15–23.
10. McKee D. C., Simmons O. D., Makar R. J. et al. Real-time IR/EO scene simulator (RISS) product improvements. *Proc. SPIE*. 2003. Vol. 5092. P. 259–267.
11. Guissin R., Lavi E., Palatnik A. IRISIM: Infrared Imaging Simulator. *Proc. SPIE*. 2005. Vol. 5784. P. 190–203.
12. Franning J., Halford C., Jacobs E. et al. Multispectral imager modeling. *Proc. SPIE*. 2005. Vol. 5784. P. 136–145.
13. Arakantsev K.G. Oslablenie vliyanija vertikal'nogo gradienta temperaturi vozdušnogo trakta na pogreshnost' izmerenija pologeniya ob'ekta. *Izvestija vuzov Priborostroenie*. 2006, No. 8, S. 38–42.
14. Arakantsev K.G., Konyakhin I.A., Timofeev A.N. Precision system for motion path parameters measurement of wheel and rail transport. *Journal of Physics: Conference, Series*. 2006, 48, pp. 998–1002.

#### **Pidopryhora Yu.A. MULTI-RANGE OPTO-ELECTRONIC SYSTEMS AS THE BASIS OF ACCURACY OF GEOMETRIC MEASUREMENTS**

*A study of multiband optoelectronic systems as a basis for the accuracy of geometric measurements. It is emphasized that one of the promising areas of technology and technology development is the automation of work with the use of modern means of control, which allows to increase the productivity of equipment, save resources and reduce the share of manual labor. It is noted that the structural component of multiband optoelectronic systems have several information channels that are interconnected and the system as a whole. Two types of optoelectronic systems are identified: active and passive. The structure of the simplest system is described and the measuring scheme of the intra-basic opto-electronic system is given. Based on the scheme, the principles of determining the energy center, image coordinates are mathematically substantiated and the coordinate system of multiband optoelectronic systems is separated. The use of fiber-optic frequency sensors is substantiated and two types of deformation sensors are distinguished: distributed on the basis of the Mandelstam-Brillouin scattering effect; quasi-distributed based on the effect of resonant reflection from fiber-*

*optic Breg lattices. The advantages of each of them are described, and on the basis of the carried out analysis the technique of calculation of potentially achievable metrological characteristics for the basic methods of multiplexing and registration of a signal which is based on the spectral analysis is offered. It is emphasized that the method based on spectral multiplexing using a scanning Fabry-Perot interferometer is the most effective and popular. The structural scheme of the method is given and the interaction of all components is described. It is noted that the problem with this registration method is the piezoceramic drive used, which has a relatively high non-linearity, which is why the calibration method is required.*

**Key words:** multi-band optoelectronic systems, measurements, geometric parameters, accuracy, spectrum, information channel.

**Прокоп Ю.В.**

Одеська національна академія зв'язку імені О.С. Попова

**Трофименко О.Г.**

Національний університет «Одеська юридична академія»

**Дикий О.В.**

Національний університет «Одеська юридична академія»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ВИКЛАДАННЯ КУРСУ «АЛГОРИТМИ ТА СТРУКТУРИ ДАНИХ» ДЛЯ СТУДЕНТІВ ІТ-СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

*Досліджено світові практики викладання в університетах світу курсу CS2 як аналогу курсу «Алгоритми та структури даних» (АСД), що є базовим під час підготовки студентів галузі 12 «Інформаційні технології» в Україні. Аналіз наповнення курсу в різних зарубіжних та вітчизняних університетах показав доволі широкий спектр змістовних тем, але їх набори, поєднання та послідовність розміщення суттєво відрізняються. З'ясовано перелік тем за рейтингом того, наскільки часто вони зустрічаються у курсі в різних вишах світу. Він такий: рекурсія, алгоритми пошуку і сортування, оцінювання швидкості алгоритмів, списки, черги, стеки, дерева, купа, графи, карти і хеш-таблиці тощо. Виявлено, що в українських університетах послідовність тем у аналогічному переліку суттєво відрізняється від загальносвітових підходів. Нерідко в навчальних програмах відсутні теми рекурсії, купи і хеш-таблиць. Крім того, є явно виражений часовий перекид у бік вивчення алгоритмів, а вивченню структур даних приділяється менше уваги. Аналіз труднощів засвоєння матеріалу курсу студентами показав, що здебільшого погано сприймаються теми рекурсії і зв'язаних списків. З'ясовано, що вибір мови програмування для цього курсу залежить від регіональних тенденцій. У США університети використовують Java, Python, C++ і C. В європейських університетах – C++, C і Java. Понад 2/3 українських університетів у курсі АСД використовують мову програмування C++; серед інших мов – Python, Delphi, Java або C#. Проаналізований спектр проблем і специфіки викладання курсу АСД для студентів ІТ-спеціальностей показав актуальність пошуку нових підходів для кращого засвоєння його здобувачами вищої освіти і потребу подальшого дослідження з урахуванням регіональної специфіки.*

**Ключові слова:** алгоритми та структури даних, CS2, ІТ-освіта, мова програмування.

**Постановка проблеми.** Курс «Алгоритми та структури даних» (АСД) є одним із базових у закладах вищої освіти в Україні під час підготовки студентів галузі 12 «Інформаційні технології». В університетах світу цей курс здебільшого має назву CS2. У курсі вивчаються основні етапи проектування, розроблення та аналізу алгоритмів, досліджується ефективність алгоритмів, динамічні структури даних і алгоритми на графах тощо. Набуті навички сприятимуть написанню ефективного робочого коду у розробленні нових проєктів. Нині на співбесідах ІТ-компаній та під час оцінки кандидатів найму часто питання з алгоритмів рішення задач (Problem Solving) є ключовими. «Алгоритмічні» питання можуть становити від 60% до 100% завдань у співбесіді. Здебільшого такі завдання полягають у неочевидному вирішенні, а не у реалізації, і дають

змогу з'ясувати здатність фахівця до розроблення нового функціоналу програмного продукту та оптимізації наявного, що дасть змогу і далі просувати компанії вгору.

Важливість курсу АСД у процесі підготовки ІТ-фахівців змушує викладачів в університетах нашої країни та всього світу приділяти значну увагу вдосконаленню його викладання та шукати нові підходи для кращого засвоєння його здобувачами вищої освіти. Адже розуміння принципів роботи алгоритмів і структур даних під час розроблення програмного забезпечення дає змогу покращити продуктивність програм, поліпшити якість коду і прискорити його роботу, а тому є фундаментальним для становлення майбутніх програмістів. Алгоритми використовуються практично в усіх сферах інформаційних технологій: у криптографії, під час аналізу текстів, зображень



і відео, в біоінформатиці, аналізі великих даних, штучному інтелекті, задачах оптимізації тощо.

Важливість результативного вивчення АСД зумовлює актуальність гнучкого коригування змістовного наповнення дисципліни, перегляду її навчальної програми для приведення у відповідність до сучасних вимог ІТ-галузі, а також пошуку підходів викладання щодо покращення ефективності засвоєння матеріалу здобувачами вищої освіти.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дискусії про способи викладання базових дисциплін із програмування на першому і другому курсах навчання бакалаврату під час підготовки ІТ-фахівців (у термінології зарубіжних університетів – CS1 і CS2) не вщухають вже декілька десятиліть. Зокрема, увагу привертають роботи, які обговорюють структуру та наповнення дисциплін [1–5], мови програмування, використовуваних у вивченні курсів [6–10], і складнощі, з якими стикаються студенти під час сприйняття матеріалу [4, 11, 12]. Нині більшість досліджень у цій сфері присвячені аналізу викладання курсу CS2 в університетах Європи та США, а тому цей досвід варто переосмислити крізь призму регіональної специфіки ІТ-освіти в Україні з метою залучення успішних підходів та можливості внесення змін у робочі програми АСД в українських вишах.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження світових практик викладання курсу CS2 (АСД) в університетах з метою визначення кола найактуальніших розділів дисципліни, вивчення різних підходів до викладання, виявлення питань і завдань, що викликають найбільші труднощі у студентів під час вивчення, а також порівняння цих складників із тим, як викладається курс АСД в українських університетах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

### 1. Аналіз підходів до викладання CS2 в університетах світу

У зарубіжних університетах не існує єдиного підходу до змісту курсу CS2. Здебільшого цей курс присвячений саме алгоритмам і структурам даних, проте в частині університетів у межах CS2 вивчають засоби об'єктно-орієнтованого програмування (ООП). Цим зумовлені певні складнощі з аналізом підходів до викладання зазначеного курсу. У статті йтиметься тільки про перший варіант, коли CS2 є прототипом курсу АСД.

Курс CS2, як і більшість курсів бакалаврату ІТ-освіти, має чітко визначений набір передумов, необхідних для його успішного вивчення. Зазвичай для нього потрібне знання курсів з основ

програмування (CS1) та дискретної математики. Деякі розділи CS2 потребують знання певних розділів вищої математики.

У міжнародному дослідженні [4], яке проводиться з метою розроблення концептуального опису курсу CS2, беруть участь викладачі з усього світу. Проміжні результати дослідження дозволили сформулювати перелік тем, що вважаються найважливішими і найчастіше вивчаються у курсі CS2. До них належать: рекурсія, алгоритми пошуку і сортування, оцінювання швидкості алгоритмів, списки, черги, стеки, дерева, купа, графи, карти і хеш-таблиці. Однак вибір змістовного наповнення цього курсу, як і більшості інших, значною мірою залежить від самого університету і певного викладача, а тому набір розділів перетинається в різних університетах лише частково, не існує жодної теми, що вивчається в цьому курсі в усіх без винятку університетах.

Зазвичай під час вивчення структур даних використовується один із двох підходів: або з використанням бібліотек і класів, або із самостійною реалізацією структур даних та подальшим їх використанням [4].

Дискусійним питанням є вибір мови програмування для курсу CS2. Згідно з дослідженням [6], 42% університетів США в цьому курсі використовують мову програмування Java, 28% – Python, 16% – C++, 5% – C. Причому понад 50% вишів, які використовували Java і C++ в курсі CS1, використовують ту саму мову і в CS2. За даними [7], найпопулярнішою для вивчення структур даних є мова Java, її частка становить 34,8%. Використовуються й інші мови, наприклад, C++ [13] та C# [14]. Дослідження [8] з'ясувало, що в європейських університетах, включно з Україною, в другому семестрі першого курсу навчання використовують мови програмування: C++ (32,8%), C (28,9%) і Java (16,1%). На другому курсі в третьому і четвертому семестрі використовують відповідно мову: Java в 39% і 35,1%, C – 19,5% і 13,5%, C++ – 17% і 19,6%, а C# – 6% і 14,2%.

Вибір тієї чи іншої мови програмування для CS2 зумовлений насамперед тематичним наповненням курсу – АСД або ООП, а також підходом до використання бібліотек або до навчання власної реалізації структур даних. В останньому разі для курсу CS2 важливими є вказівники та інструменти керування пам'яттю, яких немає в явному вигляді в мовах Java і Python, а тому доречною є мова C++, яка володіє цими засобами [9]. Крім того, під час вибору мови програмування як для CS1, так і для CS2 важливим є питання безболіс-

ного переходу від одного курсу до іншого. Дослідження [9] виявило складність для розуміння студентами структури даних «зв'язані списки», що могло бути наслідком вивчення Python у курсі CS1 через відсутність у цій мові вказівників та засобів маніпулювання пам'яттю. Подібна складність виникає і після вивчення в курсі CS1 мови Java, що підтверджено дослідженням [10].

Курс CS2 є доволі складним для розуміння студентами, багато хто з них сприймає матеріал лише частково [15]. За даними [9], невдачі наприкінці цього курсу становлять 5,7%. Серед найскладніших тем курсу дослідники називають рекурсію, купу, алгоритми сортування та пошуку, аналіз швидкості алгоритмів, зв'язані списки, черги, карти і хеш-таблиці, рекурсивне оброблення дерев [4, 11, 12]. Причому перелік найскладніших тем CS2 суттєво відрізняється у різних дослідників, що може свідчити про наявність суб'єктивних чинників, таких як: розподіл часу за темами, добір завдань для лабораторних робіт, попередній досвід вивчення програмування у студентів, педагогічна майстерність викладача тощо.

## 2. Аналіз підходів до вивчення курсу АСД в Україні

На основі даних сайту [vstup.info](http://vstup.info) було складено список закладів вищої освіти України, в яких готують студентів за спеціальностями галузі знань 12 «Інформаційні технології». Далі на сайтах цих навчальних закладів було вибрано та проаналізовано силабуси, навчальні програми та/або матеріали для студентів, що є у відкритому доступі. Насамперед з'ясувалися і порівнювалися такі аспекти:

- курс АСД є самостійним курсом чи він є частиною іншого курсу;
- в якому семестрі він викладається;
- кількість кредитів;
- використовується мова програмування;
- використання бібліотек або самостійна реалізація структур даних;
- розділи, що наповнюють курс АСД.

Загалом до розгляду було взято 50 передових вишів України. З'ясовано, що традиційно курс АСД є незалежним, однак у деяких освітніх програмах він є складовою частиною курсу «Алгоритмізація та програмування» (АП), здебільшого це стосується спеціальності 122 «Комп'ютерні науки». Найпоширенішим є викладання цього курсу в третьому, рідше – у другому семестрі бакалаврату. Середня кількість кредитів – 4.

Найчастіше курс АСД складається з двох умовних частин, присвячених вивченню відповідно

алгоритмів (пошуку, сортування тощо) і структур даних (зв'язаних списків, стеків, черг, дерев, графів). Як і в зарубіжних університетах, перелік тем вивчення значно відрізняється в різних вишах України. Особливо помітними є відмінності у часових пропорціях вивчення алгоритмів та структур даних у цьому курсі. В частині університетів виявлено відчутний перебік у бік алгоритмів (зважаючи на кількість годин та тематику). У деякі програми теми з вивчення структур даних включено лише номінально або взагалі відсутні. Недостатня увага до викладання структур даних суттєво відрізняє програми курсу АСД в українських вишах від закордонних.

Аналіз 22 навчальних програм виявив 35 різних тем курсу АСД. Загальними темами, які входять до не менш ніж 10 навчальних програм дисципліни, є: базові алгоритми сортування (бульбашкове, вибором, вставками), базові структури даних (зв'язані списки, черги, стеки), алгоритми пошуку в числових послідовностях (зокрема, бінарний пошук), бінарні дерева, вдосконалені алгоритми сортування (Шелла, Хоара тощо), зовнішнє сортування, аналіз алгоритмів, загальні поняття теорії алгоритмів, алгоритми на графах, рекурсія. Ці теми названо за зменшенням частоти згадувань і без урахування кількості годин, що відводяться на їх вивчення. Інші теми мають набагато меншу кількість перетинів у навчальних програмах дисципліни АСД різних вишів. Порівнюючи ці показники із закордонними, можна дійти висновку, що деякі поширені в іноземних університетах теми (наприклад, рекурсія і алгоритми текстового пошуку) значно рідше зустрічаються в програмах курсу АСД у вишах України. Деякі теми (зокрема, купи і хеш-таблиці) відсутні в понад половині навчальних програм курсу.

Традиційно вважається, що перша частина курсу АСД (алгоритми) практично не залежить від мови програмування. Деякі університети дозволяють студентам виконувати її лабораторні роботи засобами будь-якої відомої їм мови, а в лекціях нерідко для пояснень використовують псевдокод. Друга частина курсу АСД (структури даних) вже суттєво залежить від того, яку мову взято за основу. Понад 2/3 українських університетів у курсі АСД використовують мову програмування C++. Серед інших мов у деяких навчальних програмах застосовують Python, Delphi, Java або C#. Мова програмування Delphi, як і C++, має в явному вигляді вказівники. Водночас решта названих мов їх не мають, що може ускладнювати розуміння реалізації динамічних структур даних.

Так само, як і в зарубіжних університетах, чимало українських вишів обмежуються використанням бібліотек і не вимагають від студентів вивчення самостійної реалізації структур даних. Такий підхід переважно притаманний програмам, де виявлено перекид у бік вивчення алгоритмів.

Як показує досвід викладання в Одеському державному університеті інтелектуальних технологій і зв'язку, найбільші складності у студентів викликають зв'язані списки і бінарні дерева. З'ясовано, що причиною цього є поверхневе знайомство зі вказівниками у курсі АП, який передусе дисципліні АСД. Водночас теми, пов'язані з алгоритмами пошуку і сортування, сприймаються студентами краще за інші. Це зумовлено значною увагою до вивчення засобів опрацювання масивів у курсі АП, завдяки чому теми, пов'язані з ними, надалі здаються студентам більш легкими і зрозумілими. Можливим підходом до вирішення проблем з опанування складних тем є збільшення годин на вивчення відповідних розділів, викладання за принципом від пояснення простих задач до більш складних, перегляд кількості та змісту завдань у лабораторних роботах, а також розбиття індивідуальних варіантів для виконання студентами за рівнями складності.

**Висновки.** Дослідження різних підходів до викладання курсу CS2 в зарубіжних університетах та аналогічної дисципліни АСД в українських вишах дало змогу з'ясувати, що цей курс для студентів є складним, із високим рівнем невдач на іспитах і відсівом. Зібрано та проаналізовано перелік основних тем наповнення цієї дисципліни в різних закладах вищої освіти. Аналіз навчальних програм дисципліни АСД в українських вишах виявив переважне вико-

ристання мови C++ і помітний перекид у бік вивчення саме алгоритмів під час викладання курсу. Встановлено, що серед використовуваних мов програмування у зарубіжних вишах преважує Java, далі за популярністю використання у цьому курсі йдуть мови Python та C/C++. Незалежно від методики і підходів викладання у різних університетах світу більшу частину розділів курсу студенти називають складними для розуміння, найчастіше труднощі викликають теми рекурсії, купи, зв'язаних списків тощо. Зважаючи на з'ясовані проблеми, завдання пошуку способів для підвищення успішності під час вивчення курсу залишаються вельми актуальними і потребують подальшого дослідження, при цьому варто враховувати регіональну специфіку. Адже цей курс є фундаментальним у підготовці якісних ІТ-фахівців. Знання та навички, що здобуваються студентами під час його вивчення, закладають фундаментальну базу для подальшого навчання програмування в університеті та майбутньої професійної діяльності. Успішність вивчення цього курсу суттєво впливає на засвоєння інших предметів з вивчення засобів розроблення програмного забезпечення і значною мірою пов'язана з подальшим становленням майбутнього фахівця ІТ-галузі. Здобувачі ІТ-освіти мають багато вчитися і під час навчання, і під час професійної діяльності, щоби встигати за змінами в ІТ-індустрії загалом та новими трендами у вузькоспеціалізованих напрямках. Хоча популярність ІТ-освіти зростає, майбутнім студентам варто зважати на потребу певних зусиль і самостійного навчання щодо вдосконалення теоретичних і практичних навичок із розроблення програмного забезпечення.

### Список літератури:

1. Farghally M.F., Koh K.H., Ernst J.V., Shaffer C.A. Towards a concept inventory for algorithm analysis topics. *In Proceedings of the 50th ACM Technical Symposium on Computer Science Education*. 2017. P. 207–212. DOI: 10.1145/3017680.3017756.
2. Porter L., Zingaro D., Nam Liao S., Taylor C., Webb K., Lee C., Clancy M. BDSI: A Validated Concept Inventory for Basic Data Structures. *In Proceedings of the 2019 ACM Conference on International Computing Education Research (ICER '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2019. P. 111–119. DOI: 10.1145/3291279.3339404.
3. Porter L., Zingaro D., Lee C., Taylor C., Webb K., Clancy M. Developing Course-Level Learning Goals for Basic Data Structures in CS2. *Proceedings of the 49th ACM Technical Symposium on Computer Science Education (SIGCSE '18)*. Baltimore, MD, USA, 2018. P. 858–863. URL: <https://www.cs.swarthmore.edu/~kwebb/papers/LearningGoals-SIGCSE.pdf>.
4. Wittie L., Kurdia A., Peng J., Kelly J., Huggard M. Developing a Concept Inventory for Computer Science 2: What should it focus on and what makes it challenging? *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE '20)*. 2020. P. 1–8. URL: [http://www.tara.tcd.ie/bitstream/handle/2262/92988/CS2\\_Concept\\_Inventory\\_FIE\\_2020.pdf;jsessionid=BD4D1BE6611256FB0C6A3CF76556F59C?sequence=1](http://www.tara.tcd.ie/bitstream/handle/2262/92988/CS2_Concept_Inventory_FIE_2020.pdf;jsessionid=BD4D1BE6611256FB0C6A3CF76556F59C?sequence=1).

5. Ібрагімова Л.А. Аналіз змісту робочих програм з дисципліни «Алгоритми та структура даних» у закладах вищої освіти. *Збірник наукових праць «Педагогічні науки»*. 2019. Вип. LXXXVI. С. 252-256. DOI: 10.32999/ksu2413-1865/2019-8648.
6. Siegfried R., Herbert-Berger K., Siegfried J. CS2 and the Impact of Programming Language Choice. *51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education (SIGCSE '20)*. New York, NY, USA, 2020. P. 1353. DOI: 10.1145/3328778.3372644.
7. Silva D., Aguiar R., Dvconlo D., Silla C. Recent Studies About Teaching Algorithms (CS1) and Data Structures (CS2) for Computer Science Students. *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE'19)*. Covington, KY, USA, 2019. P. 1-8. DOI: 10.1109/FIE43999.2019.9028702.
8. Aleksić V., Ivanović M. Introductory Programming Subject in European Higher Education. *Informatics in Education*. 2016. Vol. 15, No. 2. P. 163-182. DOI: 10.15388/infedu.2016.09.
9. Layman L., Song Y., Guinn C. Toward Predicting Success and Failure in CS2: A Mixed-Method Analysis. *ACM Southeast Conference (ACM SE '20)*. New York, NY, USA, 2020. P. 218-225. DOI: 10.1145/3374135.3385277.
10. Davies S., Polack-Wahl J., Anewalt K. A snapshot of current practices in teaching the introductory programming sequence. *42nd ACM technical symposium on Computer science education (SIGCSE '11)*. New York, NY, USA, 2011. P. 625-630. DOI: 10.1145/1953163.1953339.
11. Zingaro D., Taylor C., Porter L., Clancy M., Lee C., Nam L., Webb K. Identifying student difficulties with basic data structures. *In Proceedings of the 14th ACM Conference on International Computing Education Research*. 2018. P. 169-177. URL: <https://www.cs.oberlin.edu/~ctaylor/pubs/icer143-zingaroA.pdf>.
12. Tenenberg J., Murphy L. Knowing what I know: An investigation of undergraduate knowledge and self-knowledge of data structures. *Computer Science Education*. 2005. Vol. 15, No. 4. P. 297-315. DOI: 10.1080/08993400500307677.
13. Herala A., Vanhala E., Nikula U. Object-oriented programming course revisited. *In Proceedings of the 15th Koli Calling Conference on Computing Education Research (Koli Calling '15)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2015. P. 23-32. DOI: 10.1145/2828959.2828974.
14. Krpan D., Rosić M., Mladenovic S. Teaching Basic Programming Skills to Undergraduate Students. *Proceedings of CIET'14*. 2014. P. 147-158. URL: [https://www.researchgate.net/publication/275271925\\_Teaching\\_Basic\\_Programming\\_Skills\\_to\\_Undergraduate\\_Students](https://www.researchgate.net/publication/275271925_Teaching_Basic_Programming_Skills_to_Undergraduate_Students).
15. Yeomans L., Zschaler S., Coate K. Transformative and Troublesome? Students' and Professional Programmers' Perspectives on Difficult Concepts in Programming. *ACM Transactions on Computing Education*. Vol. 1, No. 1. P. 1-27. DOI: 10.1145/3283071.

**Prokop Yu.V., Trofymenko O.H., Dykyi O.V. RESEARCH OF APPROACHES TO TEACHING THE COURSE “ALGORITHMS AND DATA STRUCTURES” FOR COMPUTER SCIENCE STUDENTS**

*The article studies the world practices of teaching the CS2 course in the universities as an analogue of the "Algorithms and Data Structures" course (ADS), which is the basic one for training students in Ukraine. The analysis of the course content in various foreign and domestic universities showed a wide range of content topics, but their sets, combinations, and sequence of placement differ significantly. The list of topics is ranked according to how often they occur in the course in different universities around the world. It is as follows: recursion, search and sorting algorithms, algorithm speed estimation, linked lists, queues, stacks, trees, heap, graphs, maps, and hash tables, etc. It was revealed that in Ukrainian universities the sequence of topics in a similar list differs significantly from global approaches. Often in the curriculum, there are no topics of recursion, heap, and hash tables. Also, some Ukrainian universities have revealed a significant time bias towards studying algorithms, and less attention is paid to data structures. Analysis of the difficulties of mastering the course material by students showed that mostly the topics of recursion and linked lists are poorly perceived. It was found that the choice of programming language for this course depends on regional trends. In the US, universities use Java, Python, C++, and C. European universities use C++, C, and Java. More than 2/3 of Ukrainian universities in the ADS course use the C++ programming language; other languages include Python, Delphi, Java, or C#. The analyzed range of problems and specifics of teaching the course of ADS for students of IT specialties showed the relevance of finding new approaches for better mastering by higher education students and the need for further research taking into account regional specifics.*

**Key words:** algorithms and data structure, CS2, IT education, programming language.

УДК 371.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/35>

**Романюк О.Н.**

Вінницький національний технічний університет

**Снігур А.В.**

Вінницький національний технічний університет

**Куклій Д.В.**

Вінницький національний технічний університет

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОФОРІЄНТАЦІЙНИХ МАРШРУТІВ НА ОСНОВІ ЗАДАЧІ КОМІВОЯЖЕРА

*У статті розглянута задача оптимізації профорієнтаційних маршрутів по школах міста Вінниці. Завдяки своєму широкому застосуванню теорія про знаходження найкоротших шляхів останнім часом інтенсивно розвивається і використовується в різних галузях науки і техніки, у тому числі і для оптимального профорієнтаційного маршруту.*

*Застосування різного роду оптимізаційних методів під час професійної орієнтації молоді – це комплексна науково обґрунтована система форм, методів та засобів впливу на особу з метою оптимізації її професійного самовизначення на основі врахування професійно важливих особистісних характеристик кожного індивідуума та потреб ринку праці. Вона спрямована на досягнення збалансованості між професійними інтересами і можливостями людини та потребами суспільства в конкретних видах професійної діяльності. Професійна орієнтація є складовою частиною соціально-орієнтованої ринкової економіки, яка впливає на ринок праці, товарів, послуг та капіталу.*

*Профорієнтаційна робота сприяє цілеспрямованому розвитку здібностей людини, зростанню її професіоналізму, працездатності, збереженню здоров'я і виступає одним із важливих елементів державної політики в сфері соціального захисту та зайнятості населення, забезпечує ефективне використання трудового потенціалу особи, підвищення її соціальної та професійної мобільності. Профорієнтаційні заходи стимулюють пошук людиною найефективніших засобів підвищення свого професійно-кваліфікаційного рівня, розвиток соціально-економічної ініціативи, інтелектуальної та трудової незалежності.*

*Головною метою профорієнтаційної роботи є сприяння специфічними для неї методами посиленню конкурентоспроможності працівника на ринку праці і досягнення продуктивної зайнятості населення.*

*Основними завданнями організації системи професійної орієнтації є: заохочення та формування позитивного ставлення молоді до здобуття вищої освіти, розповсюдження інформації про ВНТУ та залучення молоді до вступу на навчання до ВНТУ.*

*Завдяки цьому у цій роботі проведений аналіз оптимальних довжин профорієнтаційних маршрутів по школах міста Вінниці з урахуванням їх поділу на допоміжні маршрути відповідно до особливостей розташування шкіл. Задача розв'язується на основі задачі комівояжера.*

**Ключові слова:** оптимізація, профорієнтаційний маршрут; задача комівояжера; кластерний метод, оптимальний маршрут.

**Постановка проблеми.** Проблемою дослідження є модифікація генетичного алгоритму шляхом додавання умов на основі кластерного методу для його практичного застосування у профорієнтаційних поїздках, що дає можливість визначити оптимальний маршрут, який враховує необхідність, через обмеження у часі, розбиття його на певну кількість підмаршрутів та необхідність перебування у певній точці маршруту впродовж заданого часу, порівняно з іншими методами, наприклад, шляхом додавання до часу поїздки

часу перебування у точках (школах) та встановлення або обмеження кількості точок у підмаршруті, або кілометражу, або часу підмаршруту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні типові способи практичного застосування оптимізаційних задач для відповідного пошуку оптимальних маршрутів [1], [2], [3], до яких можна віднести і профорієнтаційні, як правило використовують методи Дейкстри та Флойда. Так, за допомогою алгоритму Дейкстри [1] знаходиться найкоротша відстань між вершинами графа, але

цей спосіб не призначений для графів з великою кількістю вершин. Метод Флойда [2] використовує різні алгоритми для пошуку найкоротшої відстані між різними вершинами, але тут не враховується необхідність об'їхати всі вершини. Хвильовий метод [3] також використовує зазначені вище різні алгоритми, але не дає можливість задати одну і ту ж вершину як початкову та кінцеву одночасно (не враховує повернення у початкову точку). Також типові перелічені способи не дозволяють встановлювати обмеження у часі при обході вершин графа та необхідність залишитись у школі (вершині графа) на певний проміжок часу, щоб провести профорієнтаційний захід.

Так як профорієнтаційні маршрути, що розглядаються у даній роботі, мають охоплювати всі школи на визначеній території із поверненням у початкову точку в кінці робочого дня, то актуальним для цього буде використання спеціальним чином модифікованого генетичного алгоритму [4] додатково із врахування зазначених часових обмежень та застосуванням кластерного методу для поділу загальної кількості шкіл на частини із визначенням при цьому відповідних підмаршрутів [5].

#### Постановка завдання.

1. Модифікація генетичного алгоритму для практичного застосування його при оптимізації профорієнтаційного маршруту на автомобілі по школах з урахуванням часу, що виділяється на перебування в школі та часу виділеного на кожен підмаршрут;

2. Модифікація генетичного алгоритму для практичного застосування його при оптимізації профорієнтаційного маршруту на громадському транспорті по школах з урахуванням часу, що виділяється на перебування в школі та часу виділеного на кожен підмаршрут;

3. Модифікація генетичного алгоритму для практичного застосування його при оптимізації

профорієнтаційного маршруту на автомобілі по школах з урахуванням часу, що виділяється на перебування в школі та кількістю шкіл виділених на кожен підмаршрут;

4. Модифікація генетичного алгоритму для практичного застосування його при оптимізації профорієнтаційного маршруту на громадському транспорті по школах з урахуванням часу, що виділяється на перебування в школі та кількістю шкіл виділених на кожен підмаршрут;

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Оптимізація профорієнтаційного шляху по школах м. Вінниці буде здійснюватися на основі графу, вершинами якого є 35 шкіл та ВНТУ, що слугуватиме початковою та кінцевою точкою. Граф побудований на основі використання Google Maps, який аналізує всі можливі шляхи між заданими точками та показує оптимальні варіанти для переміщення між школами на автомобілі. В результаті отримано граф, на якому вершини означають школи (рис. 1).

Фрагмент таблиці часу переміщення за допомогою громадського транспорту між усіма точками побудованої з використання Google Maps зображено на рисунку 2 (час у хвилинах).

Для зручності обрахунків профорієнтаційних маршрутів на автомобілі буде використовуватися таблиця відстаней між усіма точками з використання Google Maps, фрагмент якої представлено на рисунку 3 (відстань подано у кілометрах).

Для вирішення всіх чотирьох задач поставлених у статті для пошуку оптимального профорієнтаційного маршруту необхідно здійснити модифікацію генетичного алгоритму за допомогою додавання умов, що взяті з кластерного методу k-середніх. При цьому передбачається:

1. Використання алгоритмів вирішення задачі комівояжера.

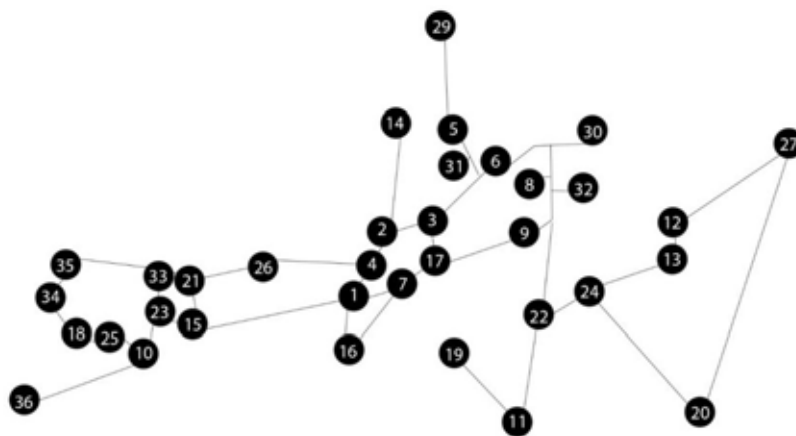


Рис. 1. Граф розміщення шкіл по м. Вінниці

	внту	Гуманітарна гімназія №1 імені М.І.Пирогова	ЗОШ І-ІІІ ст. - гімназія №2	ЗОШ І-ІІІ ст. №3 ім. М.Коцюбинського	ЗОШ І-ІІІ ст. №4 ім. Д.І. Менделєєва	ЗОШ І-ІІІ ст. №5	ЗОШ І-ІІІ ст. - гімназія №6	ЗОШ І-ІІІ ст. - ліцей №7	ЗОШ І-ІІІ ст. №8	ЗОШ І-ІІІ ст. №9	ЗОШ І-ІІІ ст. №10	ЗОШ І-ІІІ ст. №11	ЗОШ І-ІІІ ст. №12	ЗОШ І-ІІІ ст. №13
<b>внту</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Гуманітарна гімназія №1 імені М.І.Пирогова	0	32	26	29	29	31	32	35	40	39	17	56	48	50
ЗОШ І-ІІІ ст. - гімназія №2	1	32	0	16	20	15	25	25	18	30	23	29	36	25
ЗОШ І-ІІІ ст. №3 ім. М.Коцюбинського	2	26	16	0	19	9	18	19	10	26	20	29	37	33
ЗОШ І-ІІІ ст. №4 ім. Д.І. Менделєєва	3	29	20	19	0	25	29	29	26	30	23	36	35	36
ЗОШ І-ІІІ ст. №5	4	29	15	9	25	0	29	29	0	32	26	33	35	37
ЗОШ І-ІІІ ст. - ліцей №7	5	31	25	18	29	29	0	12	29	23	19	40	41	33
ЗОШ І-ІІІ ст. - гімназія №6	6	32	25	19	29	29	12	0	28	10	17	39	38	31
ЗОШ І-ІІІ ст. №8	7	35	18	10	26	8	29	28	0	30	26	29	29	31
ЗОШ І-ІІІ ст. №9	8	40	30	26	30	32	23	10	30	0	14	42	28	24
ЗОШ І-ІІІ ст. №10	9	39	23	20	23	26	19	17	26	14	0	40	25	21
ЗОШ І-ІІІ ст. №11	10	17	29	29	36	33	40	39	26	42	40	0	48	41
ЗОШ І-ІІІ ст. №12	11	54	34	37	35	35	41	38	39	28	25	48	0	34
ЗОШ І-ІІІ ст. №13	12	48	25	33	35	35	33	31	29	24	21	41	36	0
ЗОШ І-ІІІ ст. №13	13	50	34	31	34	37	32	29	31	26	22	42	36	2

Рис. 2. Фрагмент таблиці часу в переміщення за допомогою громадського транспорту

	внту	Гуманітарна гімназія №1 імені М.І.Пирогова	ЗОШ І-ІІІ ст. - гімназія №2	ЗОШ І-ІІІ ст. №3 ім. М.Коцюбинського	ЗОШ І-ІІІ ст. №4 ім. Д.І. Менделєєва	ЗОШ І-ІІІ ст. №5	ЗОШ І-ІІІ ст. - гімназія №6	ЗОШ І-ІІІ ст. - ліцей №7	ЗОШ І-ІІІ ст. №8	ЗОШ І-ІІІ ст. №9	ЗОШ І-ІІІ ст. №10	ЗОШ І-ІІІ ст. №11	ЗОШ І-ІІІ ст. №12	ЗОШ І-ІІІ ст. №13	ЗОШ І-ІІІ ст. №14	ЗОШ І-ІІІ ст. №15	
<b>внту</b>	0	0,00	4,30	5,20	5,90	4,80	6,90	6,90	5,30	7,80	7,10	2,20	8,40	9,70	9,60	6,70	2,10
Гуманітарна гімназія №1 імені М.І.Пирогова	1	4,30	0,00	1,20	2,00	0,85	3,00	3,10	1,00	3,90	3,00	4,60	4,10	5,60	5,40	5,10	3,50
ЗОШ І-ІІІ ст. - гімназія №2	2	5,20	1,20	0,00	1,30	0,55	2,30	2,40	1,00	4,60	3,10	4,20	4,20	5,70	5,50	4,10	3,10
ЗОШ І-ІІІ ст. №3 ім. М.Коцюбинського	3	5,90	2,00	1,30	0,00	1,30	2,10	2,20	1,50	2,50	1,50	5,30	4,10	4,10	3,90	4,30	4,20
ЗОШ І-ІІІ ст. №4 ім. Д.І. Менделєєва	4	4,80	0,85	0,55	1,30	0,00	2,40	2,50	0,50	3,30	2,50	4,10	3,60	5,10	5,20	4,50	3,00
ЗОШ І-ІІІ ст. №5	5	6,90	3,00	2,30	2,10	2,40	0,00	1,00	3,40	1,90	2,00	6,80	5,20	4,60	4,40	3,30	5,70
ЗОШ І-ІІІ ст. - гімназія №6	6	6,90	3,10	2,40	2,20	2,50	1,00	0,00	3,00	0,85	1,60	6,40	4,80	4,20	4,10	2,90	5,30
ЗОШ І-ІІІ ст. - ліцей №7	7	5,30	1,00	1,00	1,50	0,50	3,40	3,00	0,00	3,00	2,10	4,70	3,10	4,60	4,50	5,60	4,40
ЗОШ І-ІІІ ст. №8	8	7,80	3,90	4,60	2,50	3,30	1,90	0,85	3,00	0,00	1,30	7,30	4,10	3,30	3,20	3,70	6,20
ЗОШ І-ІІІ ст. №9	9	7,10	3,00	3,10	1,50	2,50	2,00	1,60	2,10	1,30	0,00	6,40	3,20	2,60	2,40	3,90	5,70

Рис. 3. Фрагмент таблиці відстаней між точками

2. Профорієнтаційний маршрут має початкову точку – ВНТУ.

3. За один робочий день необхідно обійти максимально можливу кількість шкіл із загальної кількості із поверненням до початкової точки.

4. Шлях при проходженні певної кількості шкіл за один робочий день є профорієнтаційним підмаршрутом.

5. За початкові дані візьмемо граф представлений на рисунку 1.

6. Обмеження кількості робочих годин на день – 6 годин або 240 кілометрів, враховуючи, що швидкість руху автомобіля по місту ( $v$ )  $40\text{км}\backslash\text{год}$ .

7. Час перебування у школі – 1 година (позначимо  $P$ )

Модифікація генетичного алгоритму передбачає:

1. Для цього розбиваємо профорієнтаційний маршрут на підмаршрути з мінімальною відстанню між точками.

2. Для розбиття використовується кластеризація методом К-середніх (мета цього методу – розділити  $n$  спостережень на  $k$  кластерів, так щоб кожне спостереження належало до кластера з найближчим до нього середнім значенням).

Зазначений метод  $k$ -середніх базується на мінімізації суми квадратів відстаней між кожним спостереженням та центром його кластера. Але даний метод не враховує необхідність починати та завершувати маршрут в фіксованій заданій точці (ВНТУ), тому для вирішення поставлених задач застосуємо один із способів вирішення задачі комівояжера – генетичний алгоритм. Генетичний алгоритм – це еволюційний алгоритм пошуку, що використовується для вирішення задач оптимізації і моделювання шляхом послідовного підбору, комбінування і варіації шуканих параметрів з використанням механізмів, що нагадують біологічну еволюцію.

Модифікуємо генетичний алгоритм шляхом додавання до нього умов на основі кластерного методу. При цьому метод кластерного аналізу доцільно застосовувати лише у симбіозі із генетичним методом, оскільки сам по собі кластерний аналіз не дає змоги враховувати початкову та кінцеву точку відправлення. Щоб реалізувати модифікований варіант генетичного алгоритму, розглянемо всі можливі варіанти обрахунку часу на поїздку до будь-якої точки.

Визначимо загальний час, витрачений на поїздку з початкової до будь-якої з точок (шкіл), час перебування у ній та час, витрачений на шлях назад до початкової точки, за формулою:

$$T=P+2\cdot E_i,$$

де  $E$  – час, витрачений на шлях від початкової точки до заданої школи.

Такий вираз справедливий для школи, що розташована відносно далеко від інших шкіл на відстані близькій до половини відстані підмаршруту, що не дозволяє занести інші точки у даний кластер, який буде складатися в даному випадку тільки з однієї школи.

Визначимо час, витрачений на поїздку з початкової до будь-якої з точок (шкіл), час перебування у ній та час, витрачений на шлях до наступної точки, за формулою:

$$T=E_i+P+S_i,$$

де  $S$  – час, витрачений на шлях від однієї школи до іншої.

Так як дана точка є першою у підмаршруті, то в ній враховується не лише час, витрачений на поїздку до неї, і час перебування у ній, а також час переміщення до наступної школи.

Визначимо час, витрачений на перебування у школі та поїздку з поточної до кінцевої точки (ВНТУ) за формулою:

$$T=E_i+P,$$

Визначимо час перебування у поточній школі та час, витрачений на шлях до наступної точки, за формулою:

$$T=P+S_i,$$

Отже, застосуємо модифікований варіант генетичного алгоритму, який використовує вищевказані формули та описується системою рівнянь:

$$M = \begin{cases} i=1 \text{ AND } i=n, & P+2\cdot E_i; \\ i=1, & E_i+P+S_i; \\ i=n, & E_i+P; \\ i \neq 1 \text{ AND } i \neq n, & P+S_i, \end{cases}$$

де  $P$  – час проведення профорієнтаційного заходу в одній школі;

$E_i$  – відстань між початковою та поточною точками;

$S_i$  – відстань між попередньою та поточною точками;

$n$  – кількість шкіл, виділених на один підмаршрут.

Елемент  $M_i$  є першим, якщо час від початкової до попередньої точки в сумі з часом, витраченим на дорогу до поточної школи, часом перебування у ній та часом переміщення з неї до кінцевої точки перевищує встановлений ліміт, що можна описати за такою нерівністю:

$$M_{i-1}+E_i+P+S_i > \text{Max},$$

де  $M_{i-1}$  – сума кілометражу/часу від початкової до попередньої точки;

$\text{Max}$  – це максимально допустима кількість часу/кілометражу для одного підмаршруту.

Елемент  $M_i$  є останнім, якщо час від початкової до попередньої точки в сумі з часом, витраченим на дорогу до поточної школи та наступної, часом перебування у ній та наступній школі та



часом переміщення з наступної точки до кінцевої точки перевищує встановлений ліміт, що можна описати за такою нерівністю:

$$M_{i-1} + E_i + 2 * P + S_i + S_{i+1} > \text{Max},$$

де  $M_{i-1}$  – сума кілометражу/часу від початкової до попередньої точки;

$S_{i+1}$  – відстань між поточною та наступною точками;

Max – це максимально допустима кількість часу/кілометражу для одного підмаршруту.

Здійснимо словесний опис алгоритму.

Крок 1. Якщо елемент є першим і останнім, то розраховуємо відстань від початкової точки до нього і назад до початкової точки, також додаємо час проведений у точці.

Крок 2. Якщо елемент є першим, то розраховуємо відстань від початкової точки до нього, додаємо час проведений у точці і час/кілометраж до наступної точки.

Крок 3. Якщо елемент є останнім, то до відстані від початкової точки до нього у даному підмаршруті, додаємо час проведений у точці і час/кілометраж до початкової точки.

Крок 4. Для усіх інших елементів додаємо до відстані від початкової точки до нього у даному підмаршруті час проведений у точці і час/кілометраж до наступної точки.

Запропонований модифікований генетичний алгоритм можна використовувати для вирішення всіх 4 задач.

Розглянемо на практиці застосування даного алгоритму. За початкові дані візьмемо: граф, представлений на рисунку 1; обмеження кількості робочих годин на день – 6 годин; час перебування у школі – 1 година; швидкість руху автомобіля по місті ( $v$ ) – 40км\год.

Розрахунки підмаршрутів для оптимізації профорієнтаційного маршруту на автомобілі по школах з урахуванням часу, що виділяється на пере-

бування в школі, та часу, виділеного на кожен підмаршрут, представлено на рис. 4.

Для того щоб оцінювати результати обчислень чотирьох задач поставлених у цій роботі в однакових одиницях виміру необхідно приведення відстані до часу, а це можна реалізувати використовуючи те що в нас в початкових даних вказано швидкість руху автомобіля по місті ( $v$ ) – 40км\год і використати формулу знаходження часу за відстанню, яку проїхав автомобіль та його швидкістю:

$$t = \frac{S}{v}$$

Отже, загальний час маршруту складає:

$$L = \frac{60 * \sum l_i}{v} = 2368 \text{ хв}$$

де  $l_i$  – відстань між точками та еквівалент часу, проведеного в точці (школі).

Розрахунки підмаршрутів для оптимізації профорієнтаційного маршруту на громадському транспорті по школах з урахуванням часу, що виділяється на перебування в школі, та часу, виділеного на кожен підмаршрут, представлено на рис. 5.

Отже, загальний час маршруту складає:

$$L = \sum l_i = 3311 \text{ хв}$$

Розрахунки підмаршрутів для оптимізації профорієнтаційного маршруту на автомобілі по школах з урахуванням часу, що виділяється на перебування в школі та кількістю шкіл виділених на кожен підмаршрут, представлено на рис. За фіксовану кількість шкіл було обрано 5, так як 5 годин виділяється на перебуванні в усіх школах підмаршруту і година на рух автомобіля по місту. Оскільки швидкість автомобіля складає 40 км/год, то кожного дня буде проїхано до 40 кілометрів, чого достатньо для об'їзду 5 шкіл, що ми можемо побачити на рис. 6.

Отже, загальний час маршруту складає:

	Маршрут №1	Маршрут №2	Маршрут №3	Маршрут №4	Маршрут №5	Маршрут №6	Маршрут №7
	0	0	0	0	0	0	0
	1	24	29	33	5	21	32
	34	13	6	3	14	17	31
	35	8	2	9	19	16	4
	7	11	15	27	23	22	36
	10	26	20	18	12	25	30
	0	0	0	0	0	0	0
Довжина	222	224	226	225	229	221	231

Рис. 4. Результати обчислень першої задачі

$$L = \frac{60 * \sum I_i}{V} + \frac{35 * 5 * 60}{5} = 2275,6 \text{ хв.}$$

Розрахунки підмаршрутів для оптимізації профорієнтаційного маршруту на громадському транспорті по школах з урахуванням часу, що виділяється на перебування в школі та кількістю шкіл виділених на кожен підмаршрут, представлено на рис. За фіксовану кількість шкіл було обрано 3, так як 3 годин виділяється на перебуванні в усіх школах підмаршруту і 3 години на рух автомобіля по місту. Кожного дня буде проїхано до 180 хвилин, чого достатньо для об'їзду 3 шкіл, що ми можемо побачити на рис. 7.

Отже, загальний час маршруту складає

$$L = \sum I_i + \frac{35 * 3 * 60}{3} = 3261 \text{ хв.}$$

Найшвидшим способом проведення профорієнтаційного маршруту є спосіб на автомобілі з обмеженням по кількості шкіл, тому на рисунку 8 представлено граф повного профорієнтаційного маршруту, розбитого на підмаршрути.

На основі проведеного дослідження сформулюємо рекомендації для здійснення профорієнтації:

1) При обмеженні підмаршруту по кількості шкіл, можна записувати в середньому 5 шкіл для

Маршрут №1	Маршрут №2	Маршрут №3	Маршрут №4	Маршрут №5	Маршрут №6	Маршрут №7	Маршрут №8	Маршрут №9	Маршрут №10	Маршрут №11	Маршрут №12	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	24	9	8	35	22	16	17	21	36	5	18	
29	13	32	31	25	3	29	2	26	6	4	0	
23	15	10	12	14	34	33	7	20	11	27	0	
0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Довжина</b>	290	291	280	275	277	292	294	309	265	296	285	167

Рис. 5. Результати обчислень другої задачі

Маршрут №1	Маршрут №2	Маршрут №3	Маршрут №4	Маршрут №5	Маршрут №6	Маршрут №7	
0	0	0	0	0	0	0	
17	19	18	11	1	26	23	
32	20	25	22	31	2	21	
8	27	35	24	5	4	15	
30	12	34	9	29	7	10	
6	13	33	3	14	16	36	
0	0	0	0	0	0	0	
<b>Довжина</b>	26,00	29,15	5,80	21,00	19,65	11,75	10,60

Рис. 6. Результати обчислень третьої задачі

Маршрут №1	Маршрут №2	Маршрут №3	Маршрут №4	Маршрут №5	Маршрут №6	Маршрут №7	Маршрут №8	Маршрут №9	Маршрут №10	Маршрут №11	Маршрут №12	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5	2	33	24	33	15	17	3	16	27	10	18	
32	7	35	13	29	23	11	9	1	20	36	25	
30	4	34	12	6	21	19	8	14	22	26	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Довжина</b>	112,00	73,00	83,00	118,00	101,00	80,00	121,00	106,00	111,00	173,00	83,00	41,00

Рис. 7. Результати обчислень четвертої задачі

Таблиця 1

Порівняння отриманих результатів

Тип маршруту	Час проведений у одній школі (хв)	Кількість підмаршрутів	Загальний час (хв)	Середній час на один підмаршрут (хв)
На автомобілі з обмеженням по кілометражу	60	7	2368	338,3
На громадському транспорті з обмеженням по часу	60	12	3311	275,9
На автомобілі з обмеженням по кількості шкіл	60	7	2275,6	325,1
На громадському транспорті з обмеженням по кількості шкіл	60	12	3261	271,75

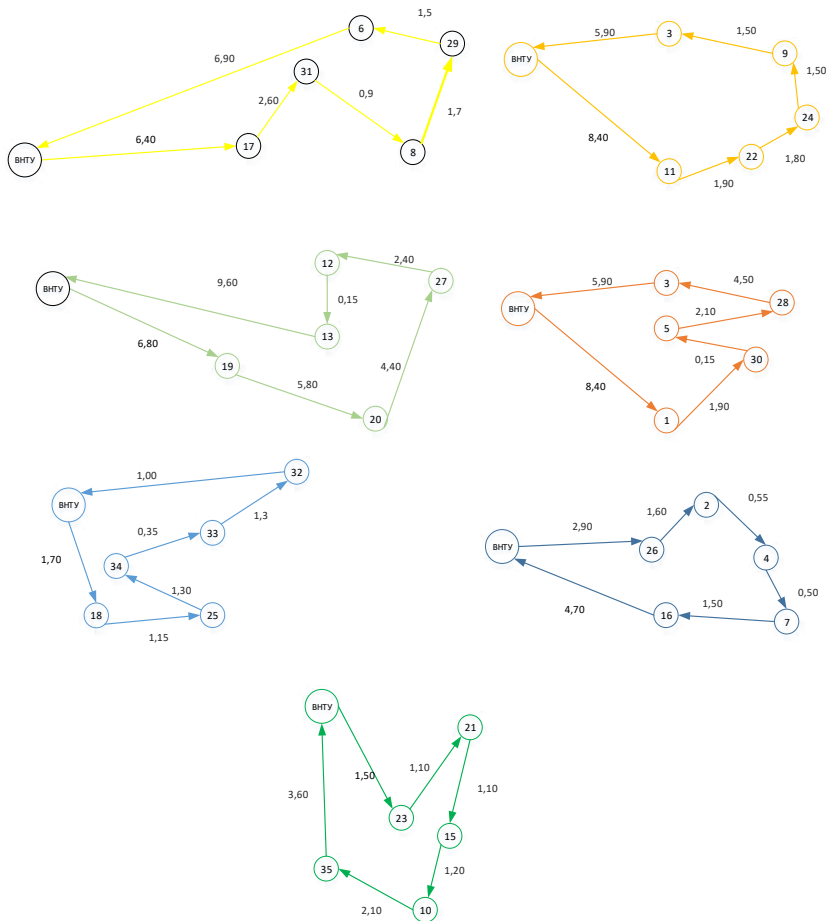


Рис. 8. Результати обчислень третьої задачі

автомобіля та три школи для громадського транспорту.

2) Щоб розрахувати кількість шкіл, що виділяються на один профорієнтаційний підмаршрут, необхідно визначити загальний час, який виділяється на один підмаршрут, що складається із часу перебування у певній кількості шкіл, що підпадають на один підмаршрут та часу, що виділяється на дорогу до них та повернення до початкової точки. Приймемо за  $P$  – час перебування в одній школі,  $k$  – кількість шкіл, яку потрібно виділити на один під маршрут,  $T_c$  – середній час на переміщення між двома будь-якими заданими точками,  $T_w$  – час виділений на один під маршрут,  $S_c$  – середній шлях між двома будь-якими заданими точками,  $v$  – середня швидкість руху автомобіля по місту.

При переміщенні громадським транспортом необхідно скористатися нерівністю:

$$P * k * T_c * (k + 1) < T_w$$

3) Щоб розрахувати кількість шкіл, що виділяються на один профорієнтаційний підмаршрут при переміщенні автомобілем, необхідно визна-

чити загальний час, який виділяється на один підмаршрут, що складається із часу перебування у певній кількості шкіл, що підпадають на один підмаршрут, та часу, що виділяється на дорогу до них та повернення до початкової точки (час розраховується за формулою  $t = \frac{S_c}{v}$ , де  $S_c$  – середній шлях між двома будь-якими заданими точками,  $V$  – середня швидкість руху автомобіля по місту). Для цього доцільно скористатися нерівністю:

$$P * k + \frac{S_c}{v} * (k + 1) < T_w$$

Щоб дізнатися кількість підмаршрутів, які необхідно зробити, щоб об'їхати всі школи в профорієнтаційній поїздки, потрібно загальну кількість шкіл поділити на  $k$ .

**Висновки.** Розглянуті методи розв'язання задачі комівояжера для профорієнтаційних заходів мають вузький спектр застосування, але повністю дозволяють створювати профорієнтаційні маршрути, враховуючи всі можливі параметри, такі як: необхідність розбити профорієнтаційний маршрут на підмаршрути, в яких початкова точка

також є кінцевою і однаковою для всіх підмаршрутів, потреба враховувати час перебування у кожній школі та обмеження в часі на кожен підмаршрут. Для цього було використано генетичний

алгоритм, модифікований спеціальним чином на основі методу кластеризації k-середніх. В залежності від потреби можна використовувати той чи інший метод.

#### Список літератури:

1. Н. Г. Аксака, С. А. Партика, Ю. Ю. Завизиступ «Використання алгоритмів пошуку найкоротшого шляху на графах», *Вісник Національного технічного університету Харківський політехнічний інститут. Серія: Інформатика і моделювання*, вип. № 46, с. 116-126, 2004.
2. О. Ф. Кузькін «Пошук шляхів у маршрутних мережах міст методом відгалужень і меж», *Науково-технічний збірник*. вип. № 103. – Х.: ХНАМГ, с. 378–388, 2012.
3. Т. Ю. Изотова «Обзор алгоритмов поиска кратчайшего пути в графе», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». *Серия: Новые информационные технологии в автоматизированных системах*, вып. № 19, с. 341-344, 2016.
4. В. И. Мудров. *Задача о коммивояжере*. – М.: «Знание», 1969.
5. Р.П. Базилевич, Р.К. Кутельмах, «Алгоритми динамічного формування моделі робочого поля для задачі комівояжера з кластерним розподілом точок» *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»*. Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології, вип. № 565, с. 200-206, 2006.

#### **Romaniuk O.N., Snigur A.V., Kuklii D.V. OPTIMIZATION OF THE ROUTES OF CAREER GUIDANCE BASED ON THE MISSION OF A SALESMAN**

*In article the problem of optimization of professional orientation routes of schools of the city of Vinnytsia is considered. Thanks to broad application, the theory about finding of the shortest ways develops intensively and used recently in various fields of science and technology including for an optimum professional orientation route.*

*Different application of optimizing methods at vocational guidance of youth is a complex evidence-based system of forms, methods and levers on the person for the purpose of optimization of her professional self-determination on the basis of accounting of professionally important personal characteristics of each individual and requirements of labor market. She is directed to achievement of balance between the professional interests and opportunities of the person and requirements of society for concrete types of professional activity. Vocational guidance is a component of socially oriented market economy which affects market of labor, goods, services and the capital.*

*Professional orientation work contributes to the purposeful development of abilities of the person, growth of her professionalism, working capacity, maintaining health and acts as one of important elements of public policy in the sphere of social protection and employment of the population, provides effective use of labor potential of the personality, increase in her social and professional mobility. Professional orientation events stimulate search by the person of effective remedies of increase in the vocational level, development of a social and economic initiative, intellectual and labor independence.*

*The main objectives of the organization of a system of professional orientation are: encouragement and formation of the positive relation of youth to receiving the higher education, dissemination of information on VNTU and involvement of youth to revenues to study in VNTU.*

*Thanks to it in this work the analysis of optimum lengths of professional orientation routes on schools of the city of Vinnytsia taking into account their division into auxiliary routes according to features of location of schools is carried out. The problem is solved on the basis of the direct-sales representative's task.*

**Key words:** *optimization, career guidance route; the mission of a salesman; cluster method, optimal route.*

**Рудьковський О.Р.**

Донецький національний технічний університет

**Киричек Г.Г.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

## ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ІЗ ПІДТРИМКИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МЕРЕЖЕВИХ ПРИСТРОЇВ ТА ДОДАТКІВ

У роботі запропоновано модель системи та метод програмної реалізації протоколу з підтримки безпечної взаємодії мережних пристроїв та додатків. У процесі реалізації системи й алгоритму її роботи найбільшу увагу приділено безпеці обміну даними і їх обробки. Для різних типів вузлів рекомендується використання різних типів пакетів. При цьому маршрутизатор повинен підтримувати безпеку передачі даних, не маючи до них доступу. Як базову запропоновано використовувати оверлейну мережу, поклавши функції передачі інформації на більш низькі рівні, абстрагуючись таким чином від мережі передачі даних, операційної системи і технологій, що використовуються. Метою роботи є проведення досліджень та реалізація програмного забезпечення для підтримки безпечної розподіленої взаємодії мережних пристроїв та додатків. Авторами пропонується об'єднати переваги мережі Ethereum та хмарних сервісів, у результаті чого розробники отримають можливість створювати додатки, використовуючи будь-яку мову програмування. При цьому відстань до серверів значно зменшиться, дані будуть надійно зашифровані та доступні лише тому, хто їх створив. Для досягнення основної мети пропонується реалізувати: метод маршрутизації клієнтів у системі, який дозволить прокласти максимально швидкий та безпечний маршрут; алгоритм запуску довільного коду в межах системи, що дасть змогу запускати будь-який код на будь-якому кінцевому вузлі максимально безпечно для користувача; метод зберігання та обміну інформацією, яка передається від додатка до додатка та від пристрою до пристрою, зберігаючись тривалий час, із можливістю отримання її у будь-який момент, а також дослідити функціонування додатків і пристроїв, спираючись на реалізовані алгоритми та методи. Використання ізольованого середовища робить процес запуску додатків відокремленим від операційної системи та інших програм, які можуть перехоплювати дані.

**Ключові слова:** мережа, алгоритм шифрування, додаток, пакет, адресація, маршрутизація.

**Постановка проблеми.** Нині майже всі додатки працюють у вигляді клієнт-серверних сервісів та дають змогу обмінюватися повідомленнями, передавати файли, отримувати новини та публікувати їх. Але сервіси не є достатньо захищеними. Особливо це стосується даних банківських карток, приватної інформації різного призначення тощо, тому їх захист є пріоритетним [1]. Виходячи з цього, вже зараз треба вирішити низку актуальних питань, пов'язаних із надійною роботою мереж у майбутньому, таких як: розроблення нових протоколів передачі інформації; перехід на децентралізовану модель роботи сервісів; збільшення їх надійності та швидкості роботи [2].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У сучасному світі вже є системи, що здатні частково виконувати поставлені завдання. Найбільш розповсюдженою та функціональною є Ethereum. Вона використовує спеціальну мову програмування Solidity та віртуальну машину – EVM.

Функціонування додатків, написаних цією мовою, є складним, оскільки мова програмування і віртуальна машина накладають певні обмеження [3].

Для запуску додатків розробники також часто використовують і хмарні обчислення, які дають змогу швидко розгортати їх нові екземпляри. До компаній, які надають такі можливості, належать Amazon, Google та Microsoft. Але використання хмарних серверів не гарантує достатнього захисту тих даних, які на них зберігаються [4]. Слід зазначити, що більшість підходів, пов'язаних з роботою сервісів в Інтернеті, нині мають низку невирішених питань. Для традиційних систем це питання безпеки зберігання даних і передачі інформації. За широкого використання різних методів шифрування вони, наприклад, повністю не захищають від атак виду man in the middle (MITM) чи проникнення на сервер, де дані зазвичай вже не є шифрованими [5]. Також розподілені системи мають недоліки, пов'язані зі швидкістю

роботи та функціональністю сервісів. У мережі Ethereum завдання обробляються «коли-небудь», функціональність обмежена. У неї немає функцій підтримки роботи з числами, мережними даними, файлами тощо.

Крім цього, для зберігання інформації у розподілених системах використовують блокчейн. Він гарантує незмінність, відкритість даних та безпеку їх зберігання. Проте блокчейн уразливий до атак типу 50%+1, коли кількість ресурсів впливає на роботу всієї системи [6].

Виходячи з цього, авторами пропонується об'єднати переваги мережі Ethereum та хмарних сервісів, у результаті чого розробники отримають можливість створювати додатки, використовуючи будь-яку мову програмування. При цьому відстань до серверів значно зменшиться, дані будуть надійно зашифровані та доступні лише тому, хто їх створив.

**Постановка завдання.** Метою роботи є проведення досліджень та реалізація програмного забезпечення для підтримки безпечної розподіленої взаємодії мережних пристроїв та додатків. Об'єктом дослідження є процес реалізації системи підтримки розподіленої взаємодії мережних пристроїв та додатків. Предметом дослідження є моделі, методи та програмні засоби організації безпечної взаємодії пристроїв та додатків у розподіленому середовищі. Для досягнення основної мети авторами пропонується реалізувати: метод маршрутизації клієнтів у системі, який дозволить прокладати максимально швидкий та безпечний маршрут; алгоритм запуску довільного коду в рамках системи, що дасть змогу запускати будь-який код на будь-якому кінцевому вузлі максимально безпечно для користувача; метод зберігання та обміну інформацією, яка передається від додатка до додатка та від пристрою до пристрою, зберігаючись тривалий час, із можливістю отримання її у будь-який момент, а також дослідити функціонування додатків і пристроїв, спираючись на реалізовані алгоритми та методи [7–8].

**Виклад основного матеріалу.** Архітектура системи схожа на звичайну архітектуру «клієнт – сервер». Система є розподіленою, кожний користувач взаємодіє з нею, використовуючи один або декілька з доступних вузлів. Хоча вузли і взаємодіють один з одним напряму, їхня робота не залежить один від одного. Вузол може підключитися до будь-якого іншого вузла і тим самим створювати новий потенційний маршрут або декілька альтернативних маршрутів. Важливим моментом у системі є підтримка роботи пристроїв, тому спроектовано відповідну модель (рис. 1).

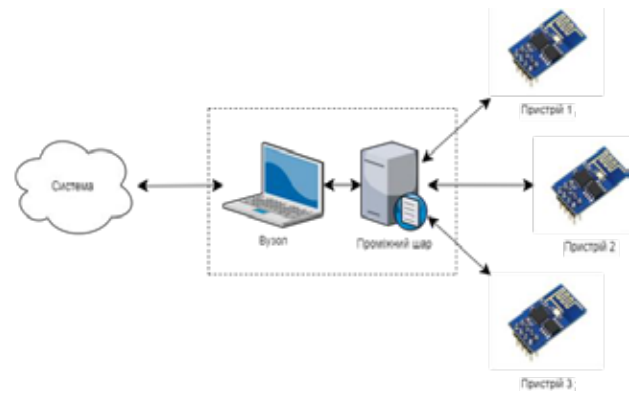


Рис. 1. Модель взаємодії пристроїв

Проміжний шар використовуємо виходячи з того, що пристрої самостійно не зможуть шифрувати дані, підраховувати хеші та приймати складні рішення так швидко, як це необхідно для їхньої роботи. Тому ці функції переносяться на найближчий захищений вузол локальної мережі [9]. Розглянувши моделі взаємодії клієнтів, вузлів та пристроїв, перейдемо до моделювання архітектури додатку [10]. Виділяємо такі загальні модулі: модуль підключень – встановлює підключення між учасниками системи за допомогою необхідного протоколу зв'язку; вхідних повідомлень – опрацьовує вхідні повідомлення по окремому підключенню; обробки пакетів – виконує обробку пакетів незалежно від підключення; шлюз – для передачі інформації іншому учаснику системи, до якого є відкрите підключення; виконавчий – для запуску додатків; проміжний шар – зв'язує пристрої та систему; підсистема пам'яті – зберігає та зчитує інформацію, яка є у системі чи на поточному вузлі; програмний проміжний шар – зв'язує ізольовані додатки з системою. При цьому система повинна працювати з кінцевими вузлами (клієнтами), пристроями та додатками у ізольованому середовищі. Оскільки пристроям та додаткам не треба передавати всю інформацію, яка необхідна для роботи системи загалом, для них використовується окремий формат даних.

Існує два підходи до створення ізольованого середовища. Перший і найбільш простий – використання віртуальних машин. Другий підхід – логічне відокремлення систем одна від одної. Таким чином, слід виконати низку кроків: створити образ (image), створити контейнер (container) та запустити додаток у ньому. Працює все це через групування процесів. Кожному ізольованому середовищу назначається унікальний номер. Процес у цьому середовищі має такий же номер, як і саме середовище. Для створення



образів та контейнерів є багато команд, але існує проміжний додаток – Docker, який робить все за розробників та адміністраторів. Всі образи створено для нього, тому він може запустити будь-який із них [11].

Особливість контейнерів – їх незмінність та гарантія роботи. Все, що працює у контейнері, втрачається після завершення роботи контейнера. Якщо образ працює на кінцевому вузлі, то він гарантовано працює і на іншому вузлі, який підтримує роботу контейнерів. Тому використання технології контейнеризації та Docker є безальтернативною для реалізації цього програмного засобу. Після встановлення Docker слід закрити та відкрити поточний термінал (якщо встановлення за допомогою SSH) або вийти та увійти у систему. Далі слід перевірити працездатність Docker, виконавши потрібні команди. Обов'язково у останній команді слід замінити youг-user на ім'я користувача, який використовує Docker. Ця команда виконує завантаження тестового образу з мережі та запускає контейнер [11].

У процесі реалізації програмного комплексу використано IDEA IntelliJ IDEA, а для проекту вибрано систему Gradle. Після створення проекту IntelliJ IDEA автоматично запускає Gradle. Він створює скелет додатку, після успішної генерації якого створюємо пакет «ua.edu.zntu.arudkovskiy.yaddro». У цьому пакеті реалізовано усі необхідні класи та інтерфейси, які виконують всі основні функції системи [12]. Цей програмний комплекс є одночасно і вузлом, і проміжним забезпеченням для пристроїв і додатків. Весь комплекс можна поділити на окремі функціональні частини: робота з мережею та протокол передачі інформації; базові функції системи та система команд; підсистема роботи з ізольованим середовищем (контейнерами); підсистеми роботи з додатками та підсистема роботи з пристроями.

Оскільки система є модульною, то слід розділити всі частини на окремі незалежні елементи, які взаємодіють лише з інтерфейсами інших модулів. Так, кожна частина (клас) системи має інтерфейс, що описує функції, які виконує ця частина (клас), та клас, який реалізує інтерфейс. Для зручності окремі класи згруповано у пакети. У структурі проекту виділяємо директорії: src/main, що містить код програмного засобу та src/test, у якій розміщуються тести (рис. 2).

Мережева взаємодія є однією з найважливіших частин програмного комплексу. Для її реалізації використовуємо транспортний протокол Transmission Control Protocol (TCP) та формат

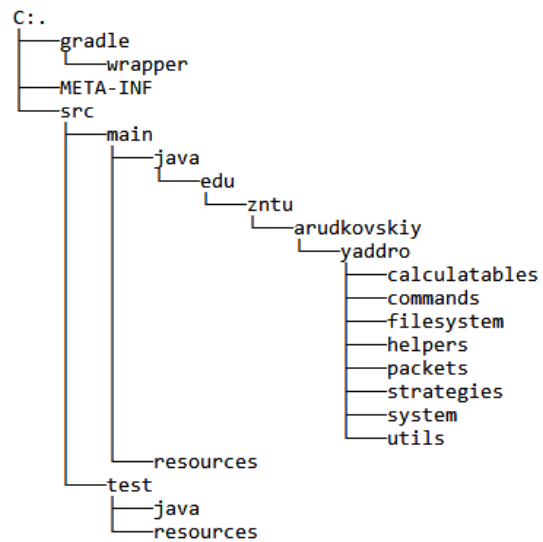


Рис. 2. Структура проекту

даних JSON. Оскільки Java не підтримує цей формат даних, додаємо сторонню бібліотеку Gson. Основним класом у підсистемі мережі є клас Connection. Цей клас виконує підключення до іншого кінцевого вузла та ініціює прослуховування порту. Він містить такі методи: bind(int port) – початок прослуховування порту; connect(String address, int port) – виконання підключення до іншого кінцевого вузла; fromSocket(Socket socket) – перетворення сокету Java на об'єкт типу Connection; transferMyId – відправлення ідентифікатору на іншу сторону; listen – початок прослуховування підключення. Основними методами є bind та connect. Метод bind створює об'єкт типу ServerSocket для нового підключення. Отримавши нове підключення, система створює об'єкт типу Connection, використовуючи метод fromSocket. Оскільки програма працює у одному потоці, а підключень може існувати безліч, під час кожного прослуховування нового порту створюється окремий потік. Крім того, під час кожного підключення до іншого вузла створюється окремий потік, у якому зчитуються дані. Основна робота сервера виконується у окремому потоці [13].

Після запуску сервера й отримання підключення додаток чекає на команду «ready» і приступає до роботи, використовуючи команди: setData – для зміни стану додатка; getData – отримання стану додатка; sendToClient – надіслати клієнту дані; getFile – отримати файл із розподіленої пам'яті; exportState – експортувати стан додатку; runForResult – запустити інший додаток та отримати результат. Додаток отримує такі команди від системи: onData – дані отримано; onFile – файл зчитано; onResult – результат

отримано; onStateExported – стан експортовано; onExternalData – отримані зовнішні дані.

**Тестування системи.** У роботі для тестування системи реалізовано додаток, який підраховує факторіал великих чисел, приймаючи як аргумент максимальне число. У циклі, поки деяка змінна менша за максимальне число, розраховується факторіал цього числа. Тестування проводилося на вузлі у віртуальній машині. Для неї виділено 4 ГБ оперативної пам'яті та 4 віртуальних ядра. Як операційна система використовується Debian із графічним інтерфейсом Gnome. Усі заміри швидкодії проводилися лише у цій віртуальній машині, тому вони є об'єктивними. Для тестування розроблено спеціальний додаток, який опубліковано у системі; додаток запущено декілька разів у різних конфігураціях: у ізолюваному середовищі; в ізолюваному середовищі з використанням системи та без ізолюваного середовища. Для кожного із сценаріїв підраховано середній час обчислення факторіалу (рис. 3):

```
package edu.zntu.arudkovskiy.app_for_testing;
import ua.edu.zntu.arudkovskiy.yaddro.api.YaddroApi;
public class Main { private int x;
public static void main(String[] args) {
Main main = new Main();
main.x = Integer.parseInt(args[0]);
YaddroApi yaddroApi = YaddroApi.getInstance();
main.doSomething(); }
private void doSomething() {
for (int i = 1; i <= x; i++) {
calculateFor(i);
} }
private void calculateFor(int number) {
long time1 = System.nanoTime();
long factorial = factorial(number);
long time2 = System.nanoTime();
System.out.println(time2 - time1); }
public static long factorial(int number) {
long result = 1;
for (int factor = 2; factor <= number; factor++) {
result *= factor;
}
return result; }
}
```

Рис. 3. Обчислення факторіалу

Максимальним числом, для якого розраховувався факторіал, є 40. Перші 20 результатів для дослідження не враховуються, оскільки виконуються операції над відносно малими числами та є особливості роботи додатків на мові Java [14]. За результатами тестування побудовано графік швидкості виконання додатку (рис. 4). На графіку ось X – число, для якого виконується розрахунок,

а Y – час у наносекундах. Оскільки віртуальній машині виділено достатньо ресурсів і операція для тестування не є досить складною, то і час виконання є малим. Результат роботи без системи і без ізолюваного середовища є одночасно еталонним для даної віртуальної машини і можливим для запуску додатку на хмарному сервері.

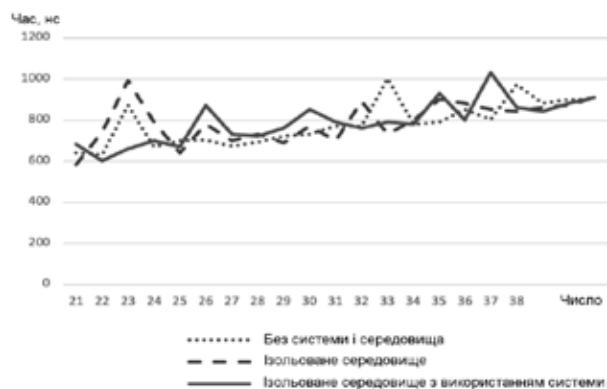


Рис. 4. Порівняння швидкості роботи

Як видно з графіку, час обробки однакової задачі у реалізованій системі та за використання традиційних інструментів має особливості. Система надає такі ж самі можливості, як і традиційні системи, і час виконання додатків у системі практично не відрізняється від часу виконання у традиційних системах, але самі додатки працюють у захищеному середовищі з високим рівнем захисту. Для перевірки правильності роботи з мережею використано програмне забезпечення WireShark. У цьому додатку перехоплено увесь трафік, що проходив через певний порт, перехоплено ключові пакети та перевірено їх коректність (рис. 5). Спочатку – обмін ідентифікаторами, а далі досліджено пакет запиту на виконання:

У цьому методі спочатку створюється необхідна команда, заповнюється ідентифікатор додатка, вказуються аргументи командного рядка та відправляється запит за допомогою іншої команди (ResolveChainAndSend), яка спочатку буде ланцюг, опитуючи вузли рекурсивно, і вже потім надсилає необхідному команду.

**Висновки.** У роботі наведено модель системи та вдосконалено процес взаємодії мережних пристроїв та додатків у розподілених системах. Реалізовано методи взаємодії окремих частин системи та компонентів додатків. Застосування методів шифрування і передачі інформації підвищують безпеку передачі даних за рахунок багатошарового шифрування даних, а використання ізолюваного середовища робить процес запуску додатків



```

RunApplication runApplication = new RunApplication();
runApplication.appId =
"bad42fbfdb131aab1e61cc7ac7dea4b3bc5ec044fe94e4d511c71e76ba49e40f4048d
eee655bfb3b32304e91fee98eda4b145e839a21d1d344e7a28ca412b33f";
runApplication.args = new String[] { "40" };
runApplication
.setOnMessage(message -> System.out.println("Message: " + message))
.setOnResponse(response -> { /* ... */ })
.setOnEvent((event, eventArgs) -> { /* ... */ });

try {
(new ResolveChainAndSend())
.setPayload(runApplication)
.setTargetId("node1")
.setRaw(new byte[0])
.execute();
} catch (Exception e) {
e.printStackTrace();
}

```

Рис. 5. Перехоплення трафіку

відокремленим від операційної системи та інших програм, які можуть заважати роботі або перехоплювати дані. Використання модульного автоматичного тестування дає змогу бути впевненим, що усі частини працюють так, як треба, навіть після

невеликих змін, які могли вивести певний модуль і всю систему з ладу. У подальшому планується розширення можливостей роботи системи шляхом підтримки графічних додатків і розпаралелювання процесів на пристроях мережі.

#### Список літератури:

1. Corson S., Macker J., RFC2501: Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations, 1999, 12 p.
2. Rivest R.L., Shamir A., Adleman L.M., U.S. Patent No. 4,405,829. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1983, available at: <https://patents.google.com/patent/US4405829/en>.
3. Dannen C., Introducing Ethereum and solidity, vol. 1, Berkeley: Apress, 2017, 181 p., doi:10.1007/978-1-4842-2535-6.
4. Jansen W.A., Grance T. Guidelines on security and privacy in public cloud computing, NIST Special Publication 800-144, 2011, 70 p., available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/legacy/sp/nistspecialpublication800-144.pdf>.
5. Rahim R., Man-in-the-middle-attack prevention using interlock protocol method. ARPN J. Eng. Appl. Sci, 12(22), 2017, pp. 6483–6487.
6. Kolesnikov P., Beketnova Y., Krylov G., Blockchain technology. Analysis of attacks, defense strategies, LAP Lambert Academic Publishing, 2017, 67 p.
7. Kirichek G., Tymoshenko V., Rudkovskiy O., Hrushko S., Decentralized System for Run Services, in CMIS-2019, 2019, pp. 860–872.
8. Kirichek G., Kyrychek D., Hrushko S., Timenko A., Implementation the Protection Method of Data Transmission in Network, in: International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), IEEE, 2019, pp. 129–132.
9. Corbellini A., Elliptic curve cryptography: a gentle introduction, 2015, available at: <http://andrea.corbellini.name/2015/05/17/elliptic-curve-cryptography-a-gentle-introduction/>.
10. Киричек, Г.Г., Киричек, О.О., Модель системи оцінки ідентичності програмного коду, Науковий вісник Чернівецького національного університету, Комп'ютерні системи та компоненти, 2(3), 2011, С. 10–17.
11. Pathania N., Setting up jenkins on docker and cloud, in: Pro Continuous Delivery. Apress, Berkeley, CA, 2017, pp. 115–143.
12. Krochmalski J., IntelliJ IDEA Essentials. Packt Publishing Ltd, 2014, 288 p.
13. Kirichek G., Harkusha V., Timenko A., Kulykovska N., System for detecting network anomalies using a hybrid of an uncontrolled and controlled neural network. In CS&SE@ SW 2019, 2019, pp. 138–148.

14. Bose S., Mukherjee M., Kundu A., Banerjee M., A comparative study: java vs kotlin programming in android application development, International Journal of Advanced Research in Computer Science, 9(3), 2018, pp. 41–45.

**Rudkovskiy O.R., Kyrychek H.H. SOFTWARE PACKAGE TO SUPPORT DISTRIBUTED INTERACTION OF NETWORK DEVICES AND APPLICATIONS**

*The paper proposes a system model and a method of software implementation of the protocol to support secure interaction of network devices and applications. In the process of implementing the system and the algorithm of its operation, the greatest attention is paid to the security of data exchange and processing. It is recommended to use different types of packages for different types of nodes. In this case, the router must maintain the security of data transmission without having access to them. As a basic, it is proposed to use an overlay network, putting the functions of information transfer at lower levels, thus abstracting from the data network, operating system and technologies used. The paper proposes to combine the advantages Ethereum network and cloud services. As a result, developers will be able to create applications using any programming language. This will significantly reduce the distance to the servers and the data will be securely encrypted and available only to those who created them. To achieve distributed interaction between applications and devices is proposed: to implement methods of routing clients in the system, which will allow to lay the fastest and safest route; to improve methods of encrypting information in the system, which will encrypt data so as to ensure their security and inaccessibility in case of interception by attackers; to implement a method and algorithm for running arbitrary code within the system, which will allow you to run any code on any computer as safely as possible for the user on whose device this application runs; to implement methods and algorithms for storing and exchanging information in the system, which are transmitted from application to application and from device to device and stored for a long time with the possibility of obtaining them at any time; to investigate the algorithms of functioning applications and devices, the basis which are implemented algorithms and methods. The use of an isolated environment makes the process of launching applications separate from the operating system and other programs that may intercept data.*

**Key words:** network, encryption algorithm, application, packet, addressing, routing.

УДК 678.002.8(075)

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-1/37>**Тарахтій О.С.**

Державний університет «Одеська політехніка»

**Бутенко О.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Вимоги до технологій переробки твердих побутових відходів (ТПВ) – це ефективність, безпека й екологічність через способи повторного використання, сортування, розділення й утилізації. Дослідження показали, що накопичення відходів у країнах, що розвиваються, впливає на глобальну стійкість навколишнього природного середовища. Спалювання відходів – це найбільш ефективний спосіб, тому що їх обсяг зменшується на порядок, і є можливість отримувати теплову енергію, як наслідок, мінімізується шкідливе навантаження на навколишнє середовище, але синтезуються шкідливі органічні сполуки.

Запропоновано для імітаційного моделювання різних груп ТПВ умовну формулу, в якій в основу покладено масові або об'ємні частки складових частин органічних сполук ТПВ, а також їх хімічні формули. Імітаційне моделювання різних груп ТПВ умовною формулою дало змогу їх класифікувати за чотирма групами. Класифікаційною ознакою стала кількість атомів в органічній сполуці, яка притаманна тим чи іншим видам ТПВ.

У роботі розглядається універсальна піролізна технологія, в основу якої покладена переробка підготовленої сировини. Кожній групі ТПВ відповідає свій процес термічної переробки на установці. Для регулювання кількості підведеного тепла використовується вуглистіт залишок, який по суті спалюється в зоні хімічної реакції. Використання вуглистого залишку збільшує кількість  $CO_2$  в суміші, яку утворює продукт-газ.

Проаналізовані дані, які визначають кількісний розподіл сірки, хлору і фтору між твердою і газовою фазами на вході в систему очистки газу технології піролізу. Отримані результати дозволяють оцінити концентрацію  $HCl$ ,  $HF$ ,  $SO_3$  в продукт-газі, який надходить у систему газоочистки. Основними елементами системи сухої газоочистки є циклон із рукавним тканинним фільтром і попередньо включена камера змішання для подачі в потік продукт-газу сухого порошку лужного сорбенту  $Ca(OH)_2$  або  $Na_2CO_3$ .

Розроблена технологічна схема проведення піролізу ТПВ, в основу якої було закладено властивості вивчених технологій. Крім того, були внесені додаткові технологічні прийоми. Додатково визначена область окиснення ТПВ як «фільтраційне горіння». У більшості відомих технологій передбачається, що реакції піролізу протікають як процес окислення сировини підігрітим повітрям, а керування проходить через рециркуляцію частини отриманого продукт-газу, яку використано для балансування термічним навантаженням.

**Ключові слова:** тверді побутові відходи, імітаційна модель, продукт-газ, кислі гази, піролізна установка, вуглистіт залишок, рукавний фільтр, сухий метод очистки газів.

**Постановка проблеми.** Декларація з Охорони навколишнього середовища і розвитку була прийнята в 1992 році на Міжнародній конференції ООН в Ріо-де-Жанейро, де визначено світову політику щодо безпечної та екологічно прийнятної утилізації ТПВ. Вимоги до технологій переробки ТПВ – це ефективність, безпека й екологічність через способи повторного використання, сортування, розділення й утилізації [1, с. 3820; 2, с. 491; 3, с. 252]. Низка досліджень [2, с. 492] показали, що накопичення відходів у

країнах, що розвиваються, впливає на глобальну стійкість навколишнього природного середовища [3, с. 253]. Більше того, поліпшення економічного розвитку країн приведе до того, що міські агломерації до 2025 року будуть генерувати 1,3 мільярда тонн ТПВ на рік [4]. Відкрите полігонне зберігання ТПВ в розвинених країнах вважається неприйнятним, дослідження показали [4; 5, с. 228], що такий спосіб утилізації викликає локальні повені, забруднення землі, води і повітря. Великобританія, США, Японія, Італія

ввели безвідходне муніципальне управління ТПВ [6, с. 164], куди входять насамперед технології термічної утилізації і повторне використання та переробка. Аналіз джерел статистичної інформації дозволив сформувати таблицю 1.

Найпоширеніший спосіб утилізації ТПВ – це полігонне захоронення. Спалювання ТПВ – найбільш ефективний спосіб, тому що їх обсяг зменшується на порядок, і є можливість отримувати теплову енергію, як наслідок, мінімізується шкідливе навантаження на навколишнє середовище, але синтезуються шкідливі органічні сполуки. Тому в подальшому в межах розглянутого розділу доцільно розглянути утворення ТПВ та провести аналіз їх складу та класифікувати для їх термічної переробки.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Результати систематизації досліджень [7, с. 80; 8, с. 9; 9, с. 69], які показують утворення ТПВ на одну людину протягом року в різних країнах ЄС, було зведено в таблицю 2.

Такі країни, як Швейцарія, Швеція та ФРН, відмовилися від полігонів ТПВ. Ці країни інвестують кошти в такі методи утилізації відходів, як сортування, спалювання та переробка. Румунія, Польща, Чехія, Латвія, Угорщина та Литва – це країни, які більшість своїх відходів утилізують на полігонах, а переробка, спалювання та сортування займає незначну частку. Отже, в Німеччині, Швейцарії, Швеції показник переробки відходів від загальної кількості всіх відходів в країні становить 46,6%, 32,6% та 33,3% відповідно. В інших країнах він коливається від 16,6% до 25%, в Румунії цей показник становить лише 6%.

Як свідчать матеріали, збір і переробка ТПВ – актуальне питання для нашої країни. Українські екологи, науковці представили матеріали про кількість ТБО в Україні і як вона зростає кожного поточного року. Полігони, розташовані за межами міст, перенаповнені ТПВ. Проблема утилізації відходів в міських ЖКГ стоїть дуже гостро і періодично посилюється надзвичайними ситуаціями, стан ТПВ в Україні наведено в таблиці 3 [10].

Таблиця 2

## Обсяг утворення ТПВ в країнах ЄС

Країна	ТПВ	
	Питомий показник, на 1 чол. в рік, у кг	Збираються за рік, млн т
Австрія	418	5,70
Бельгія	492	4,35
Угорщина	463	4,70
Німеччина	587	20,50
Данія	820	3,20
Ірландія	730	3,20
Іспанія	609	22,70
Італія	540	32,50
Нідерланди	599	9,30
Португалія	452	4,60
Фінляндія	822	2,50
Франція	570	28,00
Чехія	316	4,64
Швейцарія	352	2,70
Швеція	471	4,20

У відкритих джерелах для умов України не було знайдено результатів систематичних досліджень морфологічного складу ТПВ. Єдиними джерелами статистичних даних були невеликі дослідження, які проводилися операторами ТПВ та відповідними асоціаціями в той чи інший час у тих чи інших регіонах. Їх результати суттєво різняться між собою. Наприклад, згідно з дослідженнями, проведеними в межах національного проекту «Чисте місто», найбільші частки у морфологічному складі ТПВ припадають на продукти харчування (більш ніж 30% загального обсягу) та відходи упаковки, в основному картон і папір [11, с. 230]. За даними інших досліджень [12, с. 410], до структури ТПВ входять харчові відходи – 35–50%, папір і картон – 10–15%, полімери – 9–13%, скло – 8–10%, метали – 2%, текстиль – 4–6%, будівельні відходи – 5%, деревина – 1% та інші відходи – 10% [13, с. 52]. Розбіжності в даних, скоріше за все, пов'язані з обмеженим обсягом вибірки. Обробка даних [11, с. 8231; 12, с. 410] дала змогу отримати такі результати по морфологічному

Таблиця 1

## Співвідношення методів утилізації ТПВ в різних країнах

Технології утилізації	Країни								
	США	Велика Британія	Франція	ФРН	Австрія	Італія	Україна	Японія	Південна Корея
Термічна	17	7	37	21	73	13	6	70	18
Полігонна	81	92	53	73	19	84	94	17	79
Компостна		1	10	6	7	3		1	2
Інші	2				1			12	1

Стан ТПВ за адміністративно-територіальним поділом України, без урахування анексованих територій АР Крим і частки Луганської та Донецької областей [10]

Адміністративно-територіальний поділ	Обсяги ТПВ			
	захоронення на полігоні – всього станом на 2019 р.		зібрано всього за 2019 р.	
	млн м <sup>3</sup>	млн т	млн м <sup>3</sup>	млн т
Вінницька	32,16	64,07	1,48	0,29
Волинська	16,24	48,33	1,12	0,33
Дніпропетровська	44,16	76,33	4,98	0,83
Донецька	64,49	18,56	2,70	0,54
Житомирська	26,59	7,05	1,38	0,31
Закарпатська	11,81	3,60	1,32	0,33
Запорізька	52,02	12,72	3,70	0,61
Івано-Франківська	16,82	3,88	1,03	0,19
Київська	27,64	44,66	1,95	0,35
Кіровоградська	18,61	4,46	1,71	0,37
Луганська	15,17	4,04	0,67	0,16
Львівська	623,06	7,73	4,08	0,69
м. Київ	49,87	13,45	7,83	1,45
Миколаївська	70,50	14,96	1,28	0,22
Одеська	33,96	8,49	3,39	0,85
Полтавська	43,69	8,40	1,90	0,31
Рівненська	34,17	7,92	1,25	0,23
Сумська	12,54	0,39	0,80	0,18
Тернопільська	22,98	5,65	0,92	0,29
Харківська	81,12	16,12	3,74	0,75
Херсонська	28,54	8,37	0,76	0,18
Хмельницька	47,39	9,72	1,65	0,35
Черкаська	14,92	3,48	1,27	0,19
Чернівецька	10,49	2,62	0,80	0,20
Чернігівська	34,16	8,33	1,25	0,23
Всього по Україні:	1433,11	233,44	52,92	10,42

Таблиця 4

Морфологічний склад ТПВ за даними [13, с. 53]

Склад за масою, %															
Харчові відходи	Папір	Картон	Упаковка	ПЕТФ тара	Чорні метали	Кольорові метали	Текстиль	Скло	Деревина	Шкіра, резина	Мин. залишок	Пластмаса	Полімерна плівка	Небезпечні ТПВ	Залишок органіки
39	8	5	0,96	2,09	0,94	0,17	2	13	1	1	4,31	3	2,09	0,02	14,68

складу ТПВ для України в 2018 році: харчові відходи – 54,2%, папір і картон – 16,3%, деревина – 3,5%, метали – 4,2%, текстиль – 6,7%, скло – 4,3%, пластмаса – 6,3%. Окрім того, можливо, що частину органічних відходів не було включено до оцінки. За даними Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства України» морфологічний склад ТПВ наведено в таблиці 4.

**Постановка завдання.** Метою статті є синтез та обґрунтування імітаційної моделі ТПВ, в основу якої покладено розуміння умовної формули та розроблення схеми термічної переробки за рахунок використання технології піролізу.

Досягнення мети здійснюється розробленням таких завдань:

– класифікація ТПВ за якісним складом елементів, що їх утворюють, та імітаційне моделювання різних груп;

– визначення існуючих технологічних схем термічної переробки ТПВ на піролізних установках;

– визначення метода і технології виведення сполук Cl, S і F під час піролізу ТПВ;

– розроблення технологічної схеми термічної переробки ТПВ піролізною установкою в адиабатичному потоці.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Для імітаційного моделювання різних груп ТПВ умовною формулою розглянемо моделі, які запропоновані в [14, с. 180; 15, с. 23], де в основу покладено відомі масові або об'ємні частки складових частин органічних сполук, а також їх хімічні формули. Для цього запропоновано записувати умовну формулу ТПВ у вигляді

$$A_{b_{1T}}^{(1)} A_{b_{2T}}^{(2)} \dots A_{b_{iT}}^{(i)} \dots A_{b_{mT}}^{(m)}, \quad (1)$$

де  $A^{(i)}$  – символ  $i$ -го хімічного елемента;  $b_{iT}$  – кількість атомів  $i$ -го хімічного елемента в умовній молекулі ТПВ.

Незважаючи на таке розмаїття органічних речовин і сполук, їх можливо описати за допомогою єдиної моделі. Визначимо модель на прикладі целюлози, що включає до свого складу атоми [C], [H], [O]. Целюлоза є представником кисневмісних вуглеводнів, що охоплюють широкий клас органічних сполук. Так, додаткове врахування всього лише двох елементів [S] і [N], що зустрічаються в ТПВ в менших кількостях, дає змогу змодельовати майже всі органічні сполуки, які є складовими ТПВ [16, с. 44]. Виходячи з умов побудови моделі, немає необхідності враховувати структуру цієї речовини. В цьому разі умовна формула віскози має вигляд

$$C_{b_C} H_{b_H} O_{b_O}. \quad (2)$$

Тут  $b_C$ ,  $b_H$ ,  $b_O$  – кількість відповідних атомів в умовній формулі пального. Для целюлози

$$b_C=6, b_H=10, b_O=5. \quad (3)$$

У подальшому для зменшення кількості невідомих аргументів під час розрахунків сполук, що утворено, розрахунки проводять на один атом вуглецю, і тому остаточно умовна формула целюлози має вигляд  $C_{H_{1,666}O_{0,833}}$ .

З таблиці 4 для подальшого аналізу було відібрано лише ТПВ, які, виходячи з хімічних формул цих сполук, можна віднести до класу органічних речовин. У результаті аналізу було сформовано чотири групи ТПВ за такими ознаками: вуглеводневі; вуглеводневі, що містять кисень; вуглеводневі, що містять кисень та азот та вуглеводневі, що містять активні елементи. За правилом подання

інформації у вигляді умовної формули всі хімічні елементи розраховуються на один атом вуглецю. Отриману класифікацію наведено в таблиці 5.

У [17, с. 81] розглядається універсальна піролізна технологія, в основу якої покладена переробка підготовленої сировини. Кожній групі ТПВ відповідає свій процес термічної переробки на піролізній установці, основним елементом якої є піролізна піч (1), що являє собою шахтну піч зі вбудованою всередині швельшахтою (рис. 1). Під впливом власної ваги підготовлені ТПВ ( $a$ ) опускаються в нижню частину, де проходить хімічна реакція, куди подається підігріте до 400 °С повітря з підігрівача повітря (6), яке за кількістю недостатнє для повного згоряння відходів [17, с. 81].

Частка вуглецевого залишку, який утворюється від розкладання ТПВ, використовується для формування потрібної температури протікання реакції піролізу в (1), а продукт-газ, пройшовши циклон-сепаратором (2), живильним вентилятором (4), подається споживачеві. У цьому відношенні описана технологія нагадує технологію спалювання ТПВ з тією лише різницею, що очищення від пилу не проводиться через утворення високотемпературних газів, для яких знепилюючі установки незастосовні. Отримані в результаті піролізу компоненти продукт-газ і рідкі нафтоподібні продукти ( $c$ ) можуть бути використані для потреб енергетичного устаткування. З циклон-сепаратора (2) в бункер твердих карбонатів і силікатів (3) направляється отримана суміш, яка розділяється від твердих продуктів. Частину отриманого продукт-газу (5) використовують для підігріву повітря ( $e$ ) в (6). Через підігрівач повітря (6) димові гази ( $f$ ) після спалювання продукт-газу в (5) надходять до навколишнього середовища. Із печі (1) шлак, який було утворено, направляють у бункер шлаку (7). Дієвим недоліком такої технології є постійна зміна сировини, яка надходить на термічну переробку. Крім того, для регулювання кількості підведеного тепла використовується вуглистітний залишок, який по суті спалюється в зоні хімічної реакції. Використання вуглистого залишку збільшує кількість  $CO_2$  в суміші, яку утворює продукт-газ. Таким чином, заздалегідь спроектована установка для постійної переробки ТПВ перетворюється в циклічну, яку кожний раз потрібно налаштовувати для заданої групи ТПВ.

Ще одним недоліком при переробці ТПВ є утворення в продукт-газі кислих газів. У подальшому потрібно розглянути впроваджені технології їх утилізації.

В останній час у країнах ЄС для очищення газоподібних продуктів штучного походження від «кислих» газів найбільшу перевагу віддають сухим методам [18, с. 60], які поряд із прийнятними інвестиційними та експлуатаційними витратами, а також простою концептуальною схемою установки і компактним обладнанням забезпечують впевнене дотримання вимог, які пред'являються Європейською Директивою 2000/76 / ЄС [19, с. 92] до

викидів шкідливих складників зі штучно отриманими газами при термічній утилізації ТПВ.

З урахуванням вищесказаного, для очищення газоподібних продуктів згоряння ТПВ від «кислих» газів пропонується застосувати систему газоочистки, в основі якої лежить сухий лужний метод. Розглянемо коротко суть такого методу.

Для оцінки взаємодії були проаналізовані виконані дослідження [20, с. 80; 21, с. 16], метою яких

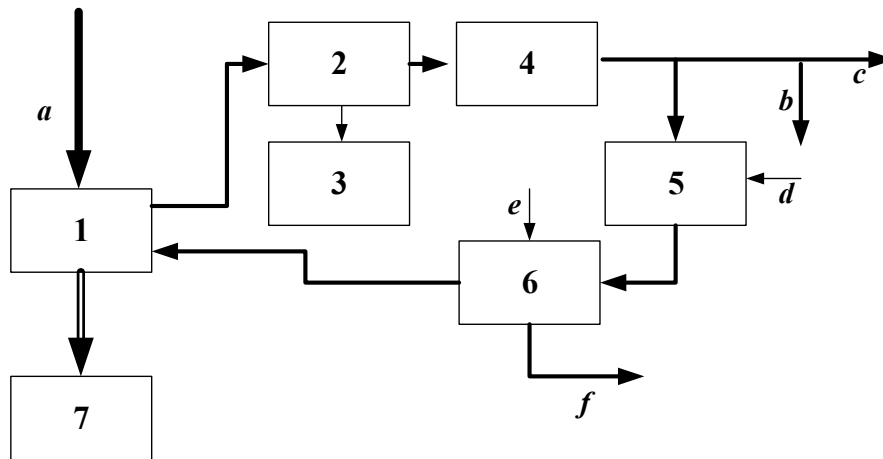


Рис. 1. Схема термічної переробки підготовлених ТПВ технологією піролізу

(1 – піч піролізу, 2 – циклон сепаратор, 3 – бункер твердих карбонатів і силікатів, 4 – живильний вентилятор, 5 – камера спалювання продукт-газу для підігріву повітря, 6 – підігрівач повітря, 7 – бункер шлаку, a – підготовлені ТПВ, b – продукт-газ на аналіз, c – продукт-газ до споживача, d – повітря для підігріву, e – повітря для регенерації, f – димові гази від камера спалювання продукт-газу)

Таблиця 5

Класифікований морфологічний склад ТПВ через представлення умовною формулою

№	Сформована група ТПВ	Назва ТПВ	Умовна формула ТПВ, базовий склад елементів С, Н, О, N	Присутність активних елементів
1	Вуглеводневі	Поліетиленова плівка	$(CH_2)_n$	
		Поліпропіленові елементи конструкцій	$(CH_2)_n$	
		Полістіренові елементи конструкцій	$(CH)_n$	
2	Вуглеводневі ті, що містять кисень	Штучний текстиль. Триацетат целюлози	$(CH_{1,777}O_{0,888})_n$	
		Папір	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		Картон	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		Упаковка	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		Деревина	$CH_{1,666}O_{0,833}$	
		ПЕТФ тара	$CH_{0,8}O_{0,4}$	
		Штучний текстиль. Віскоза	$(C_6H_{2,166}O_{0,833})_n$	
3	Вуглеводневі ті, що містять кисень та азот	Харчові відходи	$CH_{2,055}O_{0,222}N_{0,055}$	
		Штучний текстиль найлон-66	$(CH_{1,8332}O_{0,166}N_{0,166})_n$	
		Вовна	$CH_{2,5}ON_{0,5}$	
		Шкіра	$CH_{1,5}O_{0,312}N_{0,25}$	
		Залишок органіки	$CH_{2,5}ON_{0,5}$	
4	Вуглеводневі ті, що містять активні елементи	Полихлорвінільні елементи конструкцій	$(C_1H_{1,5}Cl_{0,5})_n$	Cl
		Вініліденфторидні елементи конструкцій	$(CHF_2)_n$	F
		Гума, в тому числі автомобільна	$(CH_{1,777}S_{0,444})_n$	S

було визначити кількісний розподіл сірки, хлору і фтору між твердою і газоподібною фазами на вході в систему газоочистки. Отримані результати дають змогу оцінити концентрацію HCl, HF, SO<sub>3</sub> в продукт-газі, який надходить у систему газоочистки.

У [20, с. 81; 21, с. 17] була проведена оцінка розподілу сірки, хлору і фтору по тракту установки, включаючи газоочистку. Система газоочистки включає в себе сухий реактор (абсорбер), в який для уловлювання SO<sub>3</sub>, HCl, HF подається розпилений реагент сорбент, і рукавний фільтр.

У таблицях 6 та 7 наведені результати аналізу відібраних у ході випробувань проб для визначення вмісту сірки, хлору і фтору в твердих продуктах згоряння [20, с. 81; 21, с. 18].

За даними табл. 7 можна зробити висновок, що безпосередньо з установки виводиться 86,1–88,4% сірки; 20,5–24,1% хлору; 25,7–28,5% фтору. Слід відзначити, що граничні розрахункові концентрації, що регламентуються для «кислих» газів (SO<sub>3</sub>,

HCl, HF), не перевищують відповідно 220; 300 і 15 мг/м<sup>3</sup> за нормальних умов.

Метод сухої сорбції наведено для комплексної переробки ТПВ, схема установки для якої показана на рис. 2.

При вихідних концентраціях кислих газів (SO<sub>3</sub>, HCl, HF) в синтез-газі (табл. 2.3) можливе їх очищення до спалювання методом сорбції шляхом введення реагенту Ca(OH)<sub>2</sub> або Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (g) безпосередньо в газохід у сухому розпиленому вигляді з подальшою обробкою і фільтрацією твердих частинок в циклоні з рукавним фільтром (4). З циклону видаляються продукти сорбції та винесений пил з печі піролізу (h). Розкислений продукт-газ (j) продуктивним вентилятором продукт-газу (5) направляється споживачу.

Основними елементами системи сухої газоочистки є циклон з рукавним тканинним фільтром (4) і попередньо включена камера змішання для подачі в потік продукт-газу (j) сухого порошку лужного сорбенту Ca(OH)<sub>2</sub> або Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (g).

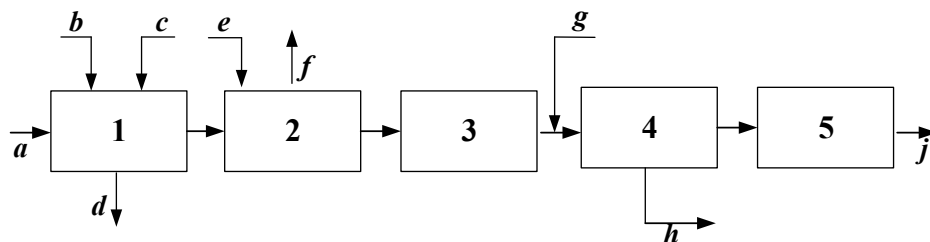


Рис. 2. Схема сухої сорбції при термічній утилізації ТПВ технологією піролізу

(1 – піч піролізу, 2 – підігрівач гарячої води; 3 – звужуючий пристрій, 4 – циклон з тканинним рукавним фільтром; 5 – продуктивний вентилятор продукт-газу, a – повітря, b – сухий порошок CaO або Na<sub>2</sub>O, c – ТПВ, d – вугільний залишок, e – холодна вода, f – гаряча вода, g – сухий порошок лужного сорбенту Ca(OH)<sub>2</sub> або Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, j – очищений продукт-газ, h – продукти сорбції та винесення пил з печі піролізу.)

Таблиця 6

Масовий вміст сірки, хлору і фтору в відібраних пробах твердих продуктів піролізу

Компонент	Вид відібраної проби		
	Вуглистіи залишок	Винесна зола утилізаційної установки	Винесна зола рукавного фільтра
SO <sub>3</sub> , %	3,3	5,05	4,85
Cl, %	0,3	2,60	10,85
F, мг/кг	8,60	8,70	10,00

Таблиця 7

Результати розрахунку виходу сірки, хлору і фтору в різних точках установки піролізу

Компонент	Вид розглянутої компоненти в елементах технології			
	Вуглистіи залишок кг/год	Газ на виході з утилізаційної установки, кг/год	Газ на виході з рукавного фільтра кг/год	Газ на виході в систему очищення кг/год
SO <sub>3</sub>	55,1	0,93	7,35	0,02
Cl	5,17	0,48	18,05	0,22
F	14,81	0,16	1,55	36,00



Основний технологічний процес очистки методом сорбції полягає в розпорошенні лужних реагентів (g) в камеру газоходу та змішуванні з потоком продукт-газу в паралельному напрямі. Для інтенсифікації перемішування і рівномірного розсіювання реагентів камера змішання виконана у вигляді пристрою звуження. Введені реагенти вступають у реакцію з кислими газами й адсорбують кислі гази, що знаходяться в газоподібному стані. Далі продукти піролізу ТПВ у вигляді пилу, кислих газів, які частково вступили в реакцію з реагентами, та залишкові реагенти потрапляють у циклон із тканинним рукавним фільтром (4), де тверді частинки осідають на поверхні фільтруючого тканини. Зі збільшенням шару твердих частинок підвищується фільтруюча здатність пиловловлювача. Крім того, реагенти, що містяться в такому шарі, забезпечують додаткове очищення продукт-газу при фільтрації їх через створений шар [22, с. 54].

Реакцію піролізу ТПВ можна уявити як:  $\text{ТПВ} + \text{енергія} = \text{C (вуглистілий залишок)} + \text{смоли} + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 + \text{C}_n\text{H}_m + \text{HCl} + \text{HF} + \text{SO}_3$ . Первинними продуктами можуть бути рідина, тверда вуглиста речовина і гази залежно від виду і параметрів процесу піролізу, вторинними – енергія, паливо та продукти органічної хімії.

Твердим продуктом піролізу є вуглистілий залишок, теплова утворююча здатність якого  $Q_{\text{рн}} = 30$  МДж/кг, вихід якого може досягати 30–35% від маси ТПВ. Вуглистілий залишок може використовуватися для технологічних потреб металургії, фармакології, для сорбційного очищення води і газів.

Газоподібні продукти, по-перше, продукт-газ, теплоутворююча здатність якого  $Q_{\text{рн}} = 15\text{--}22$  МДж/н м<sup>3</sup>, і по-друге, при частковій газифікації низькокалорійний газ ( $Q_{\text{рн}} = 4\text{--}8$  МДж/н м<sup>3</sup>). Вихід газоподібного палива може доходити до 70% від маси ТПВ. Склад газу залежить від сировини і параметрів процесу. Низькокалорійний газ використовується в самому процесі піролізу для підтримки процесу і сушіння вихідної маси ТПВ.

Сучасні технології піролізу поділяють за ознаками, які наведено в таблиці 8: швидкість нагріву (швидкий, повільний піроліз), середовище, в якому відбувається піроліз (вакуумний, гідропіроліз, метанопіроліз) [23, с 94].

На підставі аналізу технологічних схем проведення піролізу та узагальнення отриманих результатів по класифікації ТПВ та проведеного огляду літературних джерел щодо закономірностей регульованого термічного розкладання ТПВ можна зробити таке узагальнення.

1. Для кожної з груп ТПВ (див табл. 4) залежно від фізико-хімічних властивостей склад продуктів піролізу залежить від умов нагрівання температури і швидкості її зростання. Швидке нагрівання приводить до підвищення частки твердого залишку в продуктах піролізу.

2. Основні експериментальні дані щодо залежності частки твердих, рідких і газоподібних продуктів піролізу від температури і темпу нагріву отримані для харчових відходів.

3. Не виявлено у відкритих джерелах результати узагальнень експериментальних даних, які б дозволили зробити обґрунтований висновок про схожість механізмів термічного розкладання різних видів ТПВ, відповідно залежності складу

Таблиця 8

Характеристики основних технологій піролізу

Характеристики	Швидкий піроліз, низькі температури	Швидкий піроліз, високі температури	Повільний піроліз
Час процесу	1...3 с	2...5 с	до 1800 с
Розмір сировини	малий	малий	середній
Вологість сировини	дуже низька	дуже низька	низька
Температура, °C	550...650	700...1100	600...800
Надлишковий тиск, кПа	120	50...200	150
Газ:			
вихід, % маси сухої сировини	до 30	до 70	до 40
теплота згоряння, МДж/н м <sup>3</sup>	10–20	10–20	5–10
Рідина:			
вихід, % маси сухого залишку*	до 80	до 20	до 30
теплота згоряння, МДж/кг	23	23	23
Тверда речовина:			
вихід, % маси сухого залишку	до 15	до 20	20...30
теплота згоряння, МДж/кг	30	30	30

продуктів піролізу від температури та швидкості її зміни.

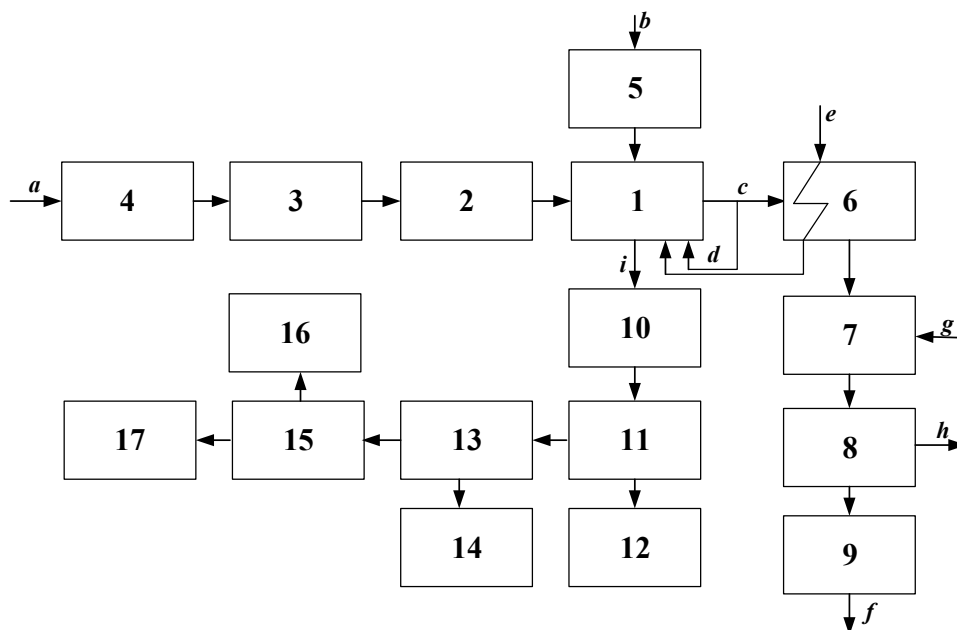
4. Не встановлено зв'язок виходу продуктів піролізу зі структурою або параметрами ТПВ, що характеризують її склад чи структуру. Відсутні результати теоретичних досліджень процесів як повільного, так і швидкого піролізу ТПВ.

З опису технологічних схем і експериментальних даних цих схем була розроблена технологічна схема проведення піролізу ТПВ, в основу якої було закладено кращі властивості опанованих технологій. Крім того, були внесені додаткові технологічні прийоми. Була додатково визначена область окислення ТПВ як «фільтраційне горіння», в більшості відомих технологій передбачається розгляд реакцій як процес окислення сировини повітрям. Ці екзотермічні реакції розглядаються як джерело теплової енергії для підтримки процесу горіння. У [24, с. 26] розглядається можливість присутності як ендотермічних окиснювачів водяної пари і діоксиду вуглецю. У цьому разі кисень повітря як окиснювач необхідний як реагент, який підтримує екзотермічну реакцію – джерело теплової енергії. В результаті виділення кращих технологічних прийомів кожної схеми на рис. 3 запропоновано

технологічну схему установки піролізу ТПВ, яка функціонує в такий спосіб.

Непідготовлені ТПВ (*a*) надходять на дробильну установку (4), далі в приймальний бункер підготовленого ТПВ (3) запропонованої установки піролізу. З приймального дозуючого бункера ТПВ подають у проміжний бункер (2), днищем якого слугує пластинчастий живильник, призначений для завантаження ТПВ в піч піролізу фільтраційного горіння (1). Крім того, в піч піролізу з бункера розчинюючих матеріалів (5) подаються лужні сполуки CaO або Na<sub>2</sub>O. Ще з підігрівача повітря в піч піролізу (6) подається регенеративне підігріте повітря (*e*). Піроліз проводиться при температурі 550–650 °С без доступу повітря або з його обмеженням. У результаті утворюється газова суміш (*c*), яка містить у своєму складі продукт-газ, що утворився, кислі гази, пари смол і твердий вуглецевмісний продукт – вуглецевий залишок (*i*). Керування процесом піролізу відбувається, на відміну від попередньо розглянутих схем, регулюванням подачі первинного продукт-газу (*d*).

Отриманий у печі вуглистім залишок (*i*) з температурою 450–500 °С у відсутності окиснювача надходить в холодильний барабан (10), де охоло-



**Рис. 3. Запропонована технологічна схема установки піролізу ТПВ**

(1 – піч піролізу фільтраційного горіння, 2 – дозуючий бункер, 3 – бункер підготовленого ТПВ, 4 – дробильна установка, 5 – бункер розчинюючих матеріалів з CaO або Na<sub>2</sub>O, 6 – підігрівач повітря для печі піролізу, 7 – звужувачий пристрій, 8 – циклон з тканинним рукавним фільтром, 9 – продуктивний вентилятор продукт-газу, 10 – холодильний барабан охолодження вуглистого залишку, 11 – електромагнітний сепаратор, 12 – бункер чорного металу, 13 – мельниця сепаратор матеріалів, 14 – бункер селікатних матеріалів, 15 – мокрий сепаратор-мельниця вуглистого залишку і кольорових металів, 16 – бункер кольорового металу, 17 – бункер вуглистого залишку, *a* – непідготовлені ТПВ, *b* – сухий порошок CaO або Na<sub>2</sub>O, *c* – отримана первина суміш продукт-газу, *d* – первинний продукт-газ який витрачено на піроліз, *e* – повітря для технологічного процесу, *i* – первинний вугільний залишок, *g* – сухий порошок лужного сорбенту Ca(OH)<sub>2</sub> або Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, *h* – продукти сорбції та винесений пил ТПВ з печі піролізу, *f* – очищений продукт-газ).

джується до 40–50 °С, і далі по стрічковому конвеєру подається на помел, попередньо пройшовши електромагнітний сепаратор (11) для вилучення залишків чорного металу, які направляються в бункер (12), і потім надходить на мельницю-сепаратор (13) для відділення силікатних фрагментів ТПВ, які направляються в бункер (14), і далі зазнає мокрому помелу (15). Подрібнені частинки розміром до 5 мм і менше, надходять на відцентрову сепарацію для вилучення фрагментів кольорових металів, які направляються в бункер (16), а вуглисті залишок направляють в бункер (17). Одночасно з цим отримана в печі (1) первинна суміш продукту-газу (с) направляється в підігрівач повітря для печі піролізу (6), де продукт-газ передає тепло повітрю.

При вихідних концентраціях кислих газів ( $\text{SO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ) в продукт-газі проходить його очищення методом сорбції шляхом керованого введення сухого порошку  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  або  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (g) безпосередньо в газогін у звужуючий пристрій (7) із подальшою обробкою і фільтрацією твердих частинок (h) в циклоні з рукавним фільтром (8). З циклону видаляються продукти сорбції та винесений пил з печі піролізу (h). Розкислений продукт-газ (j) продуктивним вентилятором продукт-газу (9) направляється споживачу.

**Висновки.** Імітаційне моделювання різних груп ТПВ умовною формулою дозволило їх класифікувати за чотирима групами. Класифікаційною ознакою стала кількість атомів в органічній сполуці, яка притаманна тим чи іншим видам ТПВ. До першої групи потрапили ТПВ, які умовно можна віднести до такої умовної формули  $\text{C}_n\text{H}_m$ , – вуглеводневі. Основу таких ТПВ становить насамперед поліетиленова плівка, поліпропіленові та поліестерені елементи штучних конструкцій. До другої групи потрапили ТПВ, які умовно можна віднести до наступної умовної формули  $\text{C}_n\text{H}_m\text{O}_k$ , – вуглеводневі, що містять кисень. Основу таких ТПВ становить насамперед папір, картон, деревина, ПЕТФ-тара, штучний текстиль (триацетат целюлози та віскоза). До третьої групи було віднесено ТПВ,

які умовно можна віднести до наступної умовної формули  $\text{C}_n\text{H}_m\text{N}_k$ , – вуглеводневі, що містять кисень і азот. Основу таких ТПВ складають насамперед харчові відходи, залишки органіки, нейлон, вовна, шкіра. До четвертої групи було віднесено ТПВ, які умовно можна віднести до умовних формул  $\text{C}_n\text{H}_m\text{F}_k$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m\text{Cl}_k$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m\text{S}_k$  – вуглеводневі, що містять активні елементи. Основу таких ТПВ складають насамперед поліхлорвінільні та вініліденфторидні елементи конструкцій, гума, в тому числі автомобільна.

Розглянуто технологічні схеми піролізу підготовлених ТПВ. Схема має свої недоліки та переваги. До недоліків було віднесено незрозумілий технологічний прийом очищення продукт-газу від кислих газів. Крім того, для регулювання кількості підведеного тепла використовується вуглисті залишок, якій по суті спалюється в зоні хімічної реакції. Використання вуглистого залишку збільшує кількість  $\text{CO}_2$  в суміші продукт-газу.

Показана оцінка розподілу сполук сірки, хлору і фтору по тракту піролізної установки. Приведено схему систему газоочистки, яка включає в себе абсорбер, в який для уловлювання кислих газів  $\text{SO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  подається розпилений реагент сорбент у вигляді сухого лужного порошку сорбенту  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  або  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , і рукавний фільтр. Для очищення газоподібних продуктів згорання ТПВ від «кислих» газів пропонується застосувати систему газоочистки, в основі якої лежить сухий лужний метод.

Показано, що вуглисті залишок має теплоутворюючу здатність  $Q_{\text{рн}}=30$  МДж/кг, вихід якого може досягати 30–35% від маси ТПВ. Продукт-газ має теплоутворюючу здатність  $Q_{\text{рн}}=15\text{--}22$  МДж/н  $\text{м}^3$ , і при частковій газифікації низькокалорійний газ  $Q_{\text{рн}}=4\text{--}8$  МДж/н  $\text{м}^3$ . Запропонована технологічна схема, де піч піролізу працює за технологією фільтраційного горіння, підігрів повітря для окиснювання здійснюється за рахунок охолодження продукт-газу, а в піч додатково для розкислення додається сухий порошок  $\text{CaO}$  або  $\text{Na}_2\text{O}$ .

#### Список літератури:

1. Cheng Hu Y. Municipal solid waste as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101, № 11. P. 3816 – 3824.
2. Sharholly M., Ahmad K., Vaishya R., Gupta R. Municipal solid waste characteristics and management in Allahabad, India. *Waste Management*. 2007. Vol. 27, № 4. P. 490 – 496.
3. Ziadat A., Mott H. Assessing solid waste recycling opportunities for closed campuses. *Management of Env Quality*. 2005. Vol. 16, № 3. P. 250 – 256.
4. World Bank. What a Waste: Global Review of Solid Waste Management. Washington: *Urban Development*, 2012.
5. Themelis N., Kim Y., Brady M. Energy recovery from New York City municipal solid wastes. *Waste Management & Research*. 2002. Vol. 20, № 3. P. 223 – 233.

6. Ahmed A. Environmental Properties of Waste By Product *Materials Used in Constructions*. J solid waste techno mgmt. 2014. Vol. 40, № 2. P. 160 – 169.
7. Систер В.Г., Мирный А.Н. Гюнтер Л.И. Экологические проблемы мегаполисов. М.: Акад. коммун. хоз-ва им. К.Д. Памфилова, 2004. 431 с.
8. Сопилко Н.Ю. Переработка отходов: анализ мировых тенденций. *Твердые бытовые отходы*. 2011. № 11. С. 9.
9. Бабанин И.В. Отходы в странах Европейского союза: статистика и динамика. *Твердые бытовые отходы*. 2011. № 6. С. 68–71.
10. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2019 рік. *Офіційний веб-сайт Міністерства розвитку громад та територій України*. 12.03.2020. URL: <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vi/> дата зверн.24.04.2020
11. Райзберг Б.А., Стародубцева Б.Б. Современный экономический словарь: *Методологические указания*. М.: ИНФА, 1999. 479 с.
12. Гринь С.А., Дреева А.С., Кызынгашева А.А. Проблемы утилизации твердых бытовых отходов в Украине. *Young Scientist*. 2018. № 10. С. 411–415.
13. «Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні»: *Практичний посібник*. За ред. Г. Гелетуха. К.: «Поліграф плюс», 2015. 72 с.
14. Глушко В.П. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: *справ. АН СССР*, ВИНТИ, 1972. Т. 1. 266 с.: ил.
15. Максимов М.В., Брунеткин А.И., Бондаренко А.В. Модель и метод определения условной формулы углеводородного топлива при сжигании. *Вост.-европ. журн. передовых технологий*. 2013. Т. 6. № 8 (66). С. 20–27.
16. Maksimov M., Davydov V., Krusir G., Maksimova O. Increasing of process efficiency of biogas plants production processing. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2017. Iss. 3. P. 43–53.
17. Петрук В.Г., Васильківський І.В., Кватернюк С.М., Турчик П.М., Іщенко В.А., Петрук Р.В. Управління та поводження з відходами. Частина 2. Тверді побутові відходи: *навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2013. 243 с.
18. Паулынтайнер Р., Граф М., Штубенволь И. Австрийская система очистки дымовых газов. *Твердые бытовые отходы*. 2007. № 4. С. 59– 63.
19. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on incineration of waste. *Official Journal of European Communities*, 28.12.2000. P. 332/91-332/111.
20. Тугов А.Н., Дик Э.П., Соболева А.Н. Оценка влияния минеральной части отходов на экологические характеристики образующихся при сжигании дымовых газов. Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы: *сб. докл. 5-ой науч.-практ. конф.*, т. 1. Челябинск, 2011. С. 78–86.
21. Тугов А.Н., Дик Э.П., Соболева А.Н. Оценка влияния минеральной части отходов на содержание в дымовых газах газообразных соединений серы, хлора и фтора. *Электрические станции*. 2011. № 10. С. 15–20.
22. Угначев В.И., Епихин А.Н., Тугов А.Н. Контроль работы газоочистного оборудования на установках для сжигания твердых бытовых отходов. *Теплоэнергетика*. 2001. № 12. С. 52–56.
23. Сидорчук О.В. Розробка комплексної технології отримання біогазу із багатокомпонентних субстратів: дис... канд. техн. наук. К., 2013. 166 с.
24. Brunetkin O., Maksymov M. V., Maksymenko A., Maksymov M. M. Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. 4/6 (100). P. 25–31.

#### **Tarakhtii O.S., Butenko O.V. SIMULATION MODEL OF SOLID WASTE AS A CONTROL OBJECT**

*Requirements for solid waste treatment technologies (SW) are efficiency, safety and environmental friendliness through the methods of reuse, sorting, separation and disposal. Studies have shown that the accumulation of waste in developing countries affects the global sustainability of the environment. Waste incineration is the most efficient way because its volume is reduced by an order of magnitude, and it is possible to obtain thermal energy and, as a result, minimize the harmful load on the environment, but synthesize harmful organic compounds.*

*A simulation modeling for different groups of solid waste conditional formula, which is based on a mass or volume fraction of the components of organic compounds solid waste, as well as their chemical formulas. Simulation of different groups of solid waste by the conditional formula allowed to classify them into four groups. The classification feature was the number of atoms in the organic compound, which is inherent in one or another type of solid waste.*

*The paper considers the universal pyrolysis technology, which is based on the processing of prepared raw materials. Each group of solid household waste corresponds to its own process of thermal processing at the installation. To regulate the amount of heat supplied, a carbonaceous residue is used, which is essentially burned in the chemical reaction zone. The use of a carbonaceous residue increases the amount of CO<sub>2</sub> in the mixture formed by the gas product.*

*Data were analyzed that determine the quantitative distribution of sulfur, chlorine and fluorine between the solid and gas phases at the entrance to the gas purification system of pyrolysis technology. The obtained results allow to estimate the concentration of HCl, HF, SO<sub>3</sub> in the product gas that enters the gas cleaning system. The main elements of the dry gas cleaning system are a cyclone with a bag filter and a pre-included mixing chamber for feeding the product gas product of dry powder of alkaline sorbent Ca(OH)<sub>2</sub> or Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.*

*A technological scheme for pyrolysis of solid household waste was developed, which was based on the properties of the studied technologies. In addition, additional technological techniques were introduced. The area of solid waste oxidation was additionally defined as "filtration combustion". Most known technologies assume that pyrolysis reactions take place as a process of oxidation of raw materials with heated air, and control takes place through the recirculation of part of the obtained product gas which is used to balance the thermal load.*

**Key words:** *solid household waste, simulation model, product gas, acid gases, pyrolysis installation, carbonaceous residue, bag filter, dry method of gas purification.*

**Топчій Н.В.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## ЕЛЕКТРОННИЙ ДОКУМЕНТООБІГ ЯК ОСНОВА СУЧАСНОГО ДОКУМЕНТУВАННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ

*Розгляд та аналізування проблем сучасного електронного документообігу на підприємстві – далеко не нове питання. Так чи інакше документообіг на підприємстві трансформується та, підпорядковуючись сучасним тенденціям, поступово переходить у електронний вигляд. Системи керування електронними технічними документами на тепер являють собою один із найважливіших компонентів автоматизації процесу конструювання та проектування технічної документації. Створення та керування технічними документами є невід’ємною складовою частиною видів діяльності, процесів і систем будь-якого підприємства. Завдяки цьому можливе досягнення ділової результативності, підзвітності, керування існуючими ризиками і безперервності ведення ділової діяльності. Створення системи електронного документообігу також дає змогу організаціям отримувати користь із цінності інформаційних ресурсів, а саме: ділові, комерційні активи, активи знань, а також робити внесок у забезпечення схоронності колективної пам’яті у відповідь на виклики глобального та цифрового середовища. [3].*

*Можливість переходу від паперових технічних документів до електронних надає можливість значно підвищити ефективність документообігу в організації. Проте методи управління паперовими документами не дають змоги повною мірою забезпечити збереження, цілісність, проходження технічної документації на підприємстві. Одночасне функціонування технічних документів як у паперовому вигляді, так і у вигляді електронного документу викликає ризик виникнення невідповідностей.*

*Отже, проведення аналізу функціонування електронного документообігу технічної документації на підприємстві може виявити певні недоліки чинного в компанії документообігу, дасть змогу більш ефективно керувати процесами створення технічних документів, процесами їх отримання, ідентифікації та можливості безпечного зберігання документації.*

**Ключові слова:** електронний документ, інтерактивний електронний документ, первинний документ, документ в електронному форматі, система керування документами, електронний документообіг.

**Постановка проблеми.** Формування системи електронного документообігу на підприємстві починається із визначення основних функцій електронного архіву, таких як створення та міграція електронних документів; відображення інформації, пошук та аналіз існуючої бази та науково-технічного супроводження. Електронний архів оптимально вирішує завдання поточного збереження документів, коли найбільшого значення набуває оперативність доступу до інформації та наявність можливості одночасного використання документа кількома співробітниками [4].

Важливим аспектом під час створення електронного архіву технічної документації є можливість підвищити ефективність діяльності архіву та реалізувати нові можливості сучасних технологій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням проблемних питань аналізування ризиків займалися такі вітчизняні науковці, як М.Б. Величків, Н.В. Мітрофан, Н.Е. Кунанець та інші.

Серед закордонних досліджень заслуговують на увагу праці А.Н. Філатова, І.В. Нікашиної, В.А. Комарова.

Водночас, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених проблемам впровадження та експлуатування електронних технічних документів, стрімке оволодіння сучасними технічними методами управління документацією зумовлює потребу подальших досліджень цієї тематики.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз сучасного стану та можливостей впровадження системи електронного документообігу на підприємстві. Без добре і надійно організованого документообігу сьогодні жодна установа не може якісно та ефективно працювати, адже він впливає на оперативність, економічність і надійність функціонування апарату управління організацією, культуру праці управлінського персоналу і власне на якість управління, займає доволі важливе місце в роботі державних органів [4].

Враховуючи це, є сенс уже розпочинати переходити на електронний формат документів, розібравшись в особливостях роботи з таким форматом документів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Перш ніж перейти до розгляду впровадження електронного документообігу конструкторських документів, слід уточнити визначення основних понять у сфері порядку обміну документами в електронному форматі.

Електронний документ – сукупність даних у пам'яті ЕОМ, призначених для сприймання людиною за допомогою відповідних програмних і апаратних засобів [1].

Документ в електронному форматі – будь-який документ, що зафіксований на носії даних електронної обчислювальної техніки, який забезпечує збереження інформації, зняття її копії та передавання інформації за допомогою електронної пошти та мережі Інтернет, з реквізитами, що дозволяють його ідентифікувати [2].

Архів(и) – документи довгострокового терміну зберігання; документи, що зберігаються для тривалого використання.

*Примітка 1. Архіви можуть бути місцем, де зберігаються та є доступними для користування архівні матеріали. Їх також називають архівним сховищем.*

*Примітка 2. Архіви можуть бути організацією, агентством або комп'ютерною програмою, відповідальною за відбір документів на зберігання, комплектування й забезпечення схоронності архівного фонду, надання доступу до архівних документів. Іноді їх також називають архівним агентством, архівною установою або архівною програмою [3].*

Документована інформація – записана інформація чи об'єкт, які можна вважати єдиним цілим [3].

Документація – сукупність документів, що описують дії, інструкції, рішення, процедури та ділові правила, які стосуються певної функції, процесу або ділової операції [3].

Конвертація – процес переміщення документів з одного формату в інший.

*Приклад.* Сканування документованої інформації (документів) на паперових носіях для створення їхніх цифрових образів (у форматах TIFF, JPEG тощо), переведення документів із формату Word у формат PDF, з формату текстового файлу UNIX у формат текстового файлу Microsoft (Windows), переведення файлів MS Word з версії 1 у версію 2 [3].

Знищення – процес знищення або видалення документів без будь-якої можливості їх відновлення [3].

Відбір та передача – процеси реалізації управлінських рішень, зафіксованих у переліках документів або інших інструментах керування документами, що стосуються знищення документів або передавання їх на подальше зберігання [3].

Документувати – записувати, надавати конкретну форму чи постачати примітками з метою подальшого відтворення [3].

Керування документами – сфера керування, відповідальна за ефективний та систематичний контроль за створенням, отриманням, збереженням, використанням, добром та передачею документів для подальшого зберігання або знищення, зокрема й процесами введення документів у систему й збереження доказів та інформації, зафіксованими у формі документів, про ділову активність та операції.

*Примітка. Також називають діловодством. [3].*

Використання новітніх комп'ютерних технологій під час формування та збереження технічної документації здатне значно полегшити процес документообігу. На підприємстві електронні технічні документи загалом мають такі переваги, як:

- можливість відстеження етапів проходження документації на всіх стадіях створення та виконання;

- значно прискорюється пошук потрібних документів;

- не витрачається зайвий час на документообіг і, як наслідок, прискорюється процес створення, узгодження, підписання та передавання документів;

- зникає необхідність зберігання великої кількості технічної документації на папері;

- можливість створення резервних копій, що значно знижує ризики втрати існуючих документів;

- забезпечення конфіденційності та запобігання витоку інформації завдяки можливості обмеження доступу до документації обмеженому колу користувачів;

- під час створення нових технічних документів максимальне використання перевірених технічних рішень, які вже зберігаються в базі даних;

- мінімізація помилок за рахунок унеможливлення виникнення декількох джерел зберігання однієї й тієї ж інформації різних версій;

- скорочення термінів навчання нових співробітників за рахунок можливості швидкого пошуку необхідних для роботи шаблонів готових документів.

Електронні технічні документи отримують у результаті автоматизованого проектування або шляхом перетворення паперових технічних доку-

ментів в електронну форму. У загальному вигляді електронний технічний документ складається з реквізитної та змістовної частин.

Змістовна частина складається з одного чи декількох файлів, які необхідно розглядати як єдине ціле та які містять необхідну інформацію про документ. Реквізитна частина складається зі структурованого за призначенням набору реквізитів та їх значень [5]. На рисунках 1, 2, 3 зображено приклади різних способів організації змістовної частини електронного документа.

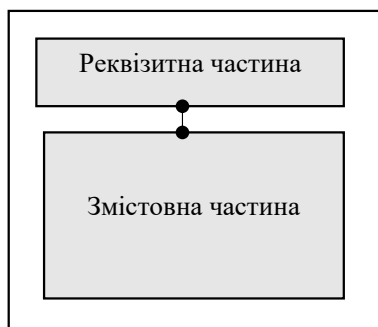


Рис. 1. Приклад простого електронного документа

Під час створення та подальшого зберігання електронних технічних документів необхідне виконання таких вимог:

1. Документ має бути цілісним.

Цілісність документа визначається його повнотою і незмінністю.

Необхідно, щоб документ був захищений від несанкціонованих змін. Політика та процедури керування документами мають вказувати, які доповнення або примітки може бути додано до документа після його створення, за яких обставин доповнення або примітки можуть бути дозволені, хто уповноважений здійснити це. Будь-які санк-

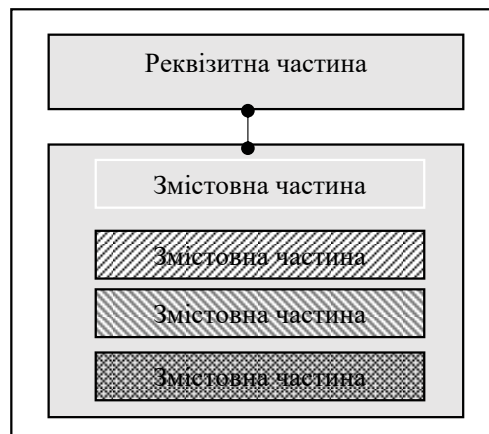


Рис. 2. Приклад складеного електронного документа

ціоновані примітки до документа, додавання або видалення в документі треба чітко документувати й контролювати [3].

2. Документ має бути автентичним.

Для забезпечення автентичності документів організації повинні запровадити та документально зафіксувати політику й процедури контролю за створенням, отриманням, передачею, збереженням і відбиранням документів.

Це гарантує, що творці документів уповноважені на це та ідентифіковані, а документи захищені від несанкціонованого доповнення, видалення, внесення змін до них, використання та приховування [3].

3. Документ має бути доступним.

Інформація, що міститься в електронних документах, повинна бути доступною для її подальшого використання.

4. Документ має бути надійним.

Надійним є документ, зміст якого можна вважати повним і точним поданням підтверджу-

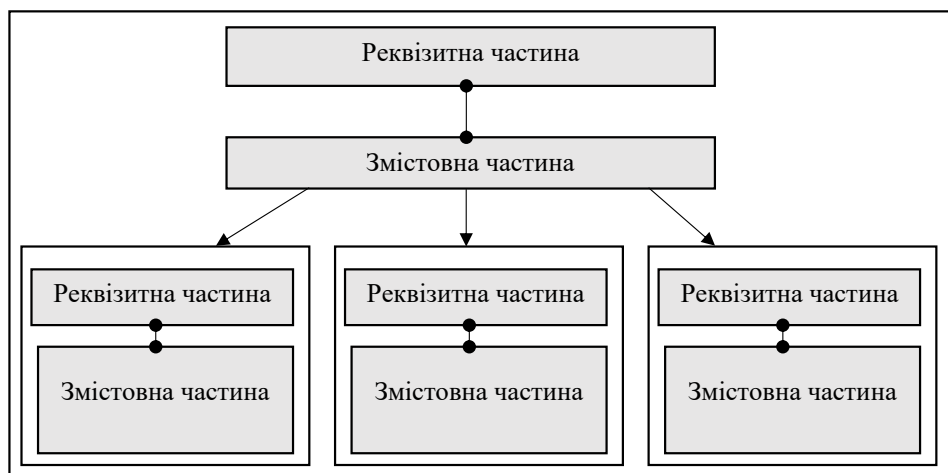


Рис. 3. Приклад агрегованого електронного документа



ваних операцій, діяльності або фактів, а також якому можна довіряти в подальших операціях або в подальшій діяльності. Документи потрібно створювати під час або відразу ж після операції чи випадку, до яких вони належать, особами, які достовірно знають факти, або засобами, що зазвичай використовують у діловій активності під час проведення такої операції [3].

### 5. Залучення співробітників.

Має бути чітко визначено відповідальність за документи, а також забезпечено навчання всіх співробітників організації, які створюють, керують або використовують документи. Це стосується постачальників, інших зацікавлених сторін, а також співробітників сторонніх організацій,

з якими в організації спільні ділові процеси, зокрема документи, які є їх результатом. Розуміння роботи з документами в межах усієї організації покращує її інформаційну базу й результативність прийнятих рішень [3].

**Висновки.** Узагальнюючи, можна зазначити, що перспективним напрямом вдосконалення документообігу на підприємстві є впровадження системи електронного документообігу, яка дасть змогу працювати із технічною документацією та забезпечить можливість розширення та вдосконалення системи зберігання інформації. Загалом упровадження електронного документообігу технічних документів – це не просто інновація, а крок до сучасного управління інформаційними потоками.

### Список літератури:

1. ДСТУ 5034:2008 Інформація і документація. Науково-інформаційна діяльність. Терміни та визначення понять.
2. ДСТУ-Н ПМГ 48:2007 Порядок обміну документами в електронному форматі.
3. ДСТУ ISO 30300:2015 Інформація та документація. Системи керування документами. Основні положення і словник термінів
4. Величкевич М.Б., Мітрофан Н.В., Кунанець Н.Е. ЕЛЕКТРОННИЙ ДОКУМЕНТООБІГ, ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/20146>.
5. ДСТУ ГОСТ 2.051:2006 Єдина система конструкторської документації. Електронні документи. Загальні положення.
6. Филатов А.Н., Никашина И.В., Комаров В.А. Электронный технический документооборот конструкторской документации как основа единого информационного пространства предприятия аэрокосмической отрасли [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektronnyu-technicheskiy-dokumentoorbot-konstruktorskoy-dokumentatsii-kak-osnova-edinogo-informatsionnogo-prostranstva>

### Topchii N.V. ELECTRONIC DOCUMENT FLOW AS THE BASIS OF MODERN DOCUMENTATION AT THE ENTERPRISE

*Consideration and analysis of the problems of modern electronic document flow at the enterprise is not a new question at all.*

*One way or another, the document flow at the enterprise is being transformed and gradually turns into an electronic form, obeying modern trends.*

*Electronic technical document management systems are currently one of the most important components of automation in the design and engineering of technical documentation.*

*Creation and management of technical documents is an integral part of the activities, processes and systems of any enterprise.*

*This enables business performance, reporting, risk management and business continuity to be achieved.*

*The creation of an electronic document flow system also enables enterprises to benefit from the value of information resources, namely: business, commercial assets, knowledge assets, as well as to contribute to ensuring the preservation of collective memory in response to the challenges of the global and digital environment.*

*The ability to move from paper to electronic technical documents provides an opportunity to significantly increase the efficiency of document flow at the enterprise. However, the methods of paper document management do not allow to fully ensure the safety, integrity, and passage of technical document flow at the enterprise.*

*Simultaneous operation of technical documents both in paper form and in the form of an electronic document causes the risk of inconsistencies.*

*Therefore, the analysis of the electronic document flow of technical documentation at the enterprise may reveal certain shortcomings of the current document flow in the company, will more effectively manage the processes of creating technical documents, the processes of obtaining, identification and safe storage of documentation.*

**Key words:** *electronic document, interactive electronic document, original document, document in electronic format, document management system.*

**Хіль В.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ПОРІВНЯННЯ КЛАСИЧНОЇ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПЕРВИННОГО ПЕРЕГРІВУ ПАРИ З ВВЕДЕННЯМ ПОХІДНОЇ У ДОВІЛЬНІЙ ТОЧЦІ З НЕЧІТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ

*У наш час автоматизують практично всі виробничі процеси. Які, у свою чергу, сприяють випуску продукції, зниженню собівартості та поліпшенню якості продукції, знижують чисельність персоналу, який займається обслуговуванням цього процесу, та підвищують надійність і довговічність машин. За рівнем автоматизації теплоенергетика займає одне із ключових місць серед інших промислових галузей. Енергетичні установки характеризуються великою кількістю безперервних процесів, що протікають у них. При цьому вироблення електричної і теплової енергії повинно відповідати навантаженню. Практично всі операції на теплоенергетичних установках автоматизовані.*

*Завдання, яке підлягає подальшому розгляду, поширене в практиці регулювання температури перегріву пари в пароперегрівачах енергетичних агрегатів. Налагодження таких систем ускладнено високими вимогами до якості перехідних процесів, особливо щодо першого динамічного відхилення. Дійсно, якщо під впливом збурень відбудеться надмірний перегрів металу пароперегрівача, то виникнуть умови для втрати ним необхідної міцності. Наслідком може стати витік пару з пароперегрівача і виникнення аварійної ситуації.*

*Підтримка температури перегріву пари має важливе значення для забезпечення надійної роботи паросилових установок. Найбільш поширеним способом регулювання температури перегріву пари є охолодження перегрітої пари вприскуванням живильної води або власного конденсату.*

*Для регулювання перегріву вторинної пари застосовується газопаровий теплообмінник. Для захисту від надмірного перегріву труб вихідного пакету при знижених навантаженнях в контурі охолоджувача існує аварійний вприскування, який при нормальній роботі котла не використовується.*

*У даній роботі наведений приклад із регулюванням температури на заданому рівні, де використовується автоматична система регулювання первинного перегріву пари з введенням похідної в довільній точці. Ми її порівняємо із системою, у якій цю систему регулює нечіткий регулятор.*

**Ключові слова:** пароперегрівач, перегрітий пар, первинний перегрів пари, автоматична система регулювання, конвективний пароперегрівач, економайзер, гаряче повітря, нечітка логіка, регулятор, перехідний процес регулювання.

**Постановка проблеми.** Поширеним способом регулювання температури перегріву пари є зменшення температури перегрітої пари шляхом вприскуванням живильної води або власного конденсату. Система регулювання первинного перегріву пари з введенням похідної в довільній точці використовується для регулювання температури.

Тому дуже важливо знайти оптимальні налаштування в регуляторі, бо саме від цього залежить якість перехідного процесу, а відповідно і ККД цілого циклу процесів. Тому буде розглянуто альтернативу існуючому ПІ регулятору з введенням похідної у довільній точці – нечіткий регулятор.

**Аналіз існуючих систем регулювання температури перегріву пари.** Опираючись на матеріал наукової літератури, а саме [1–3], я дійшов до висновку, що АСР температури перегріву пари методом вприскування власного конденсату проєктувалися з уведенням додаткового впливу по

витраті пари, але широкого застосування вони не знайшли. Існують АСР із різного роду зв'язками типу «люфт» між окремими схемами регулювання температури перегрітої пари на ділянках парового тракту котла. Вони не одержали широкого поширення через відсутність стандартних датчиків типу «Люфт» і через труднощі налагодження їх.

Автоматизація парогенераторних установок дає значні переваги:

- 1) забезпечує зменшення чисельності обслуговуючого персоналу, тобто підвищення продуктивності його праці;
- 2) приводить до зміни характеру й полегшення праці обслуговуючого персоналу;
- 3) збільшує точність підтримки параметрів вироблюваної пари;
- 4) підвищує безпеку праці й надійність роботи обладнання;
- 5) збільшує економічність роботи парогенератора.

Автоматизація барабанного парового котла містить у собі автоматизацію безлічі його складових частин технологічних ділянок у тому числі пароперегрівника.

Температура перегрітої пари на виході котла відноситься до найважливіших параметрів, що визначають економічність і надійність роботи парової турбіни й енергоблоку в цілому. Відповідно до вимог ПТЕ [1] припустимі тривалі відхилення температури перегрітої пари від номінального значення для параметрів перегрітої пари  $P_{III} = 14$  МПа й  $t_{III} = 450$  °С становить убік збільшення 5 °С, а убік зменшення 10 °С. Такі жорсткі вимоги до якості перехідних процесів й суттєва інерційність пароперегрівника як об'єкта регулювання температури змушують застосовувати для регулювання температури перегрітої пари на виході котла автоматичні системи регулювання (АСР) із додатковим імпульсом по похідній від проміжної вихідної координати. Такі системи вимагають ретельного налагодження й складні в експлуатації, особливо у випадку застосування засобів автоматизації, що настроюються на лінійні об'єкти й використовують незмінні параметри налаштувань.

Під час налагодження системи регулювання необхідне знання динамічних властивостей об'єкта, які можуть бути отримані двома способами: експериментально безпосередньо на об'єкті або аналітично під час виведення й дослідження його математичної моделі.

Перший спосіб трудомісткий, вимагає застосування спеціальних вимірювальних і самописних пристроїв, втручання в роботу об'єкта, участі в експерименті кваліфікованого персоналу. Деякі виміри, наприклад, вихідного сигналу термопари під час вимірювання відхилення температури на 5°С...10°С вимагають застосування високочутливих і високоточних самописних пристроїв.

Другий спосіб більш універсальний, вимагає суттєво менших витрат, має значну інформативність, особливо під час застосування універсальних пакетів прикладних програм на сучасних ПЕОМ, однак він відрізняється меншою точністю при його застосуванні на конкретному об'єкті. У багатобічних дослідженнях складних об'єктів перевагу варто віддавати аналітичним методам дослідження.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження системи регулювання температури перегріту пари на виході котла й підвищення якості перехідних процесів. У даній роботі ми порівняємо два способи регулювання одного об'єкта. На

малюнках буде представлено дві моделі, які регулюють температуру пару при впорскуванні води. Ми порівняємо якість регулювання двох способів.

**Виклад основного матеріалу.** Перегріта пара – пар, нагрітий до температури, що перевищує температуру кипіння при даному тиску. Перегріта пара використовується в циклах різних теплових машин із метою підвищення їх ККД. Отримання перегрітої пари відбувається у спеціальних пристроях – пароперегрівачах. Це пристрій, призначений для перегріву пара, тобто підвищення його температури вище критичної. Використання перегрітої пари дозволяє значно підняти ККД парової установки. Перегріта пара широко застосовується для живлення турбін на теплових електростанціях, з початку ХХ століття використовувався на всіх типах паровозів. Також були розроблені проекти ядерних реакторів, де частина технологічних каналів повинні були використовуватися для перегріву пара перед подачею в турбіни.

Пароперегрівач – це система трубчастих каналів, що проходять через топку. Для того щоб зменшити відкладення накипу на стінках, пароперегрівачі підключаються до системи після паросепараторов, що відокремлюють дрібні краплі води. Освіта накипу призводить до збільшення теплового опору стінок каналів, що, у свою чергу, призводить до перегріву та вигорання елементів пароперегрівача.

Динамічні властивості об'єкта за каналами збурювання й регулюючому каналу характеризуються значною інерційністю, що визначається інерційністю теплообмінників пароперегрівника, а також інерційністю термопар, використаних як первинні датчики виміру температури пари.

Так звані класичні системи регулювання дають не цілком оптимальне рішення задачі управління регулювання процесу, оскільки не надають можливості створення певної єдиної аналітичної залежності, що виражає вектор керуючих впливів при всіх можливих станах об'єкту управління, що особливо критично при різних змінах. У такому випадку раціонально звернутися до алгоритмів інтелектуального управління, які в загальному визначенні мають здатність до розуміння і навчання щодо об'єкта управління, збурень, зовнішнього середовища, умов роботи. Так, для багатьох технічних і промислових додатків, зокрема для керування електроприводами, в більшості випадків застосовуються інтелектуальні регулятори, побудовані на основі алгоритмів нечіткої логіки і штучних нейронних мереж.

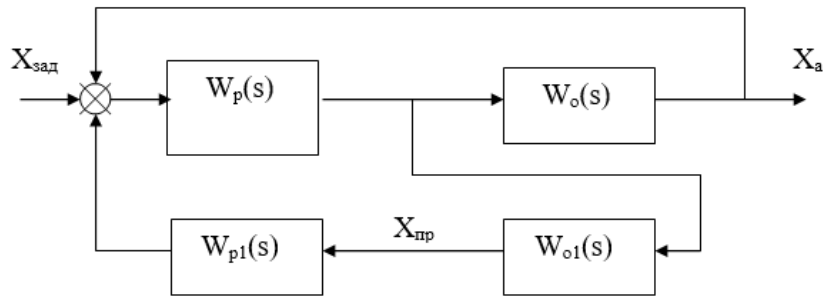


Рис. 1. Структурна схема АСР температури перегрітої пари

$W_{o1}(s)$  – передатна функція малоінерційного об’єкта за каналом «витрата вприскування – температура пари за охолодженням вприскування»;

$W_o(s)$  – передатна функція інерційного об’єкта за каналом «витрата вприскування – температура пари за пароперегрівником»;

$W_{p1}(s)$  – передатна функція диференціатора;

$W_p(s)$  – передатна функція регулятора вприскування.

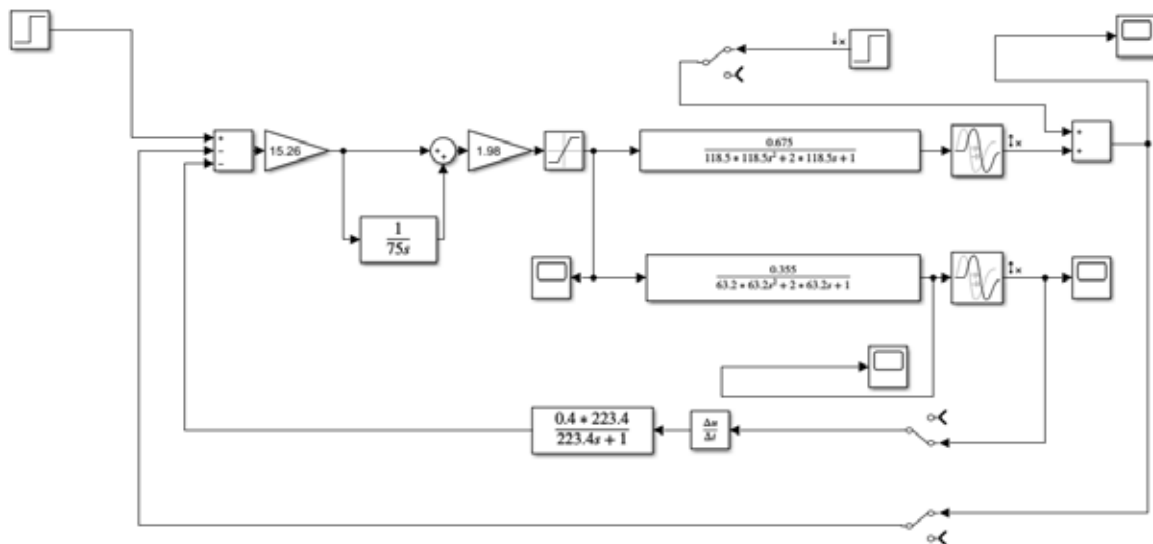


Рис. 2. АСР первинного перегріву пари з введенням похідної у довільній точці

Для реалізації заданих показників якості регулювання в різних галузях промисловості з початку винаходу і по теперішній час найбільш часто використовуваними залишаються пропорційно-інтегрально (ПІ)-регулятори, переваги яких широко відомі [1]. Існує безліч методик оптимального налаштування регуляторів, що використовуються в різних технологічних процесах [2; 3]. Однак за наявності складних об’єктів із безліччю внутрішніх перехресних зв’язків, нелінійних елементів і ланок запізнювання, параметри яких до того ж в процесі експлуатації змінюються в широких межах, традиційний метод ПІ-регулювання не може забезпечити прийнятну якість управління, тому актуальності набувають різні адаптивні методи [4; 5]. Останнім часом у вирішенні таких завдань використовуються методи інтелектуального управління, зокрема, апарат нечіткої

логіки, який переважно реалізується у вигляді різних типів регуляторів. Однак у цих роботах, як правило, використовується один апріорно заданий тип регулятора, і не наводиться порівняння з іншими типами нечітких регуляторів (НР). Також представляє інтерес аналіз роботи нечітких систем управління під час зміни параметрів об’єкта регулювання. Таким чином, ставиться завдання на прикладі системи регулювання температури пари первинного перегріву провести синтез і розглянути роботу основних типів НР прямої дії, виявити характерні особливості, а також порівняти їх роботу з традиційним пропорційно-інтегральним (ПІ)-Регулятором, в тому числі і в умовах зовнішніх і параметричних збурень.

Було взято стару схему, з такими ж налаштуваннями. Та на її основі ми примінили нечіткий регулятор.

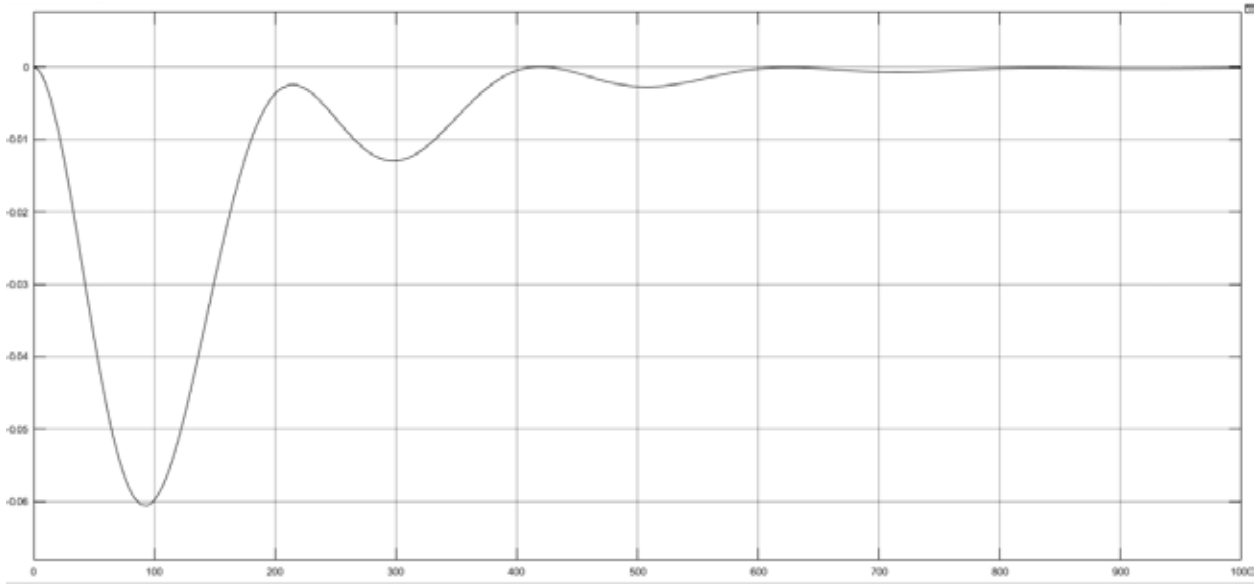


Рис. 3. Графік перехідного процесу

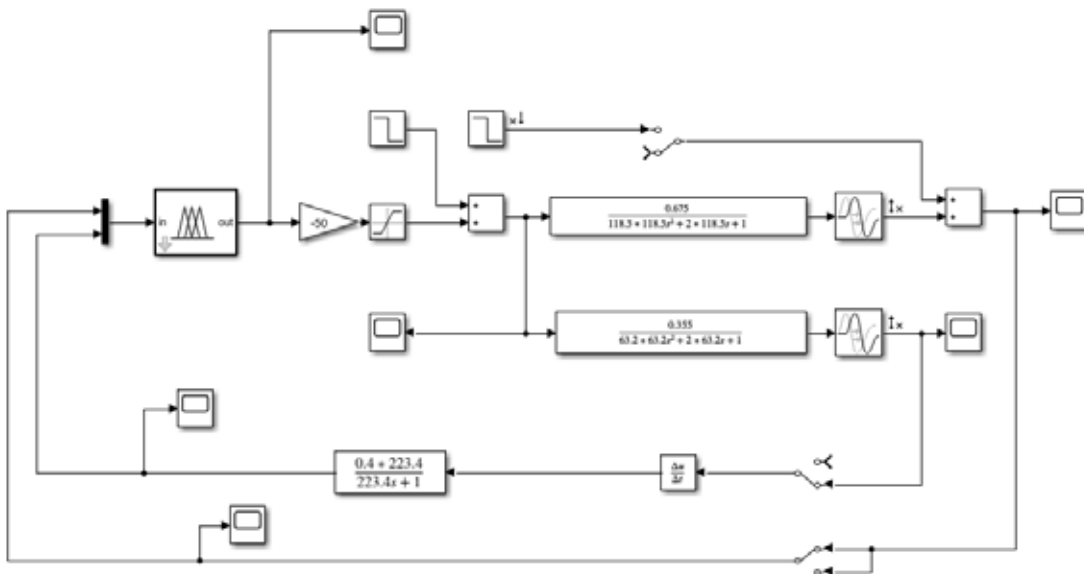


Рис. 4. АСР первинного перегріву пари з використанням нечіткого регулятора

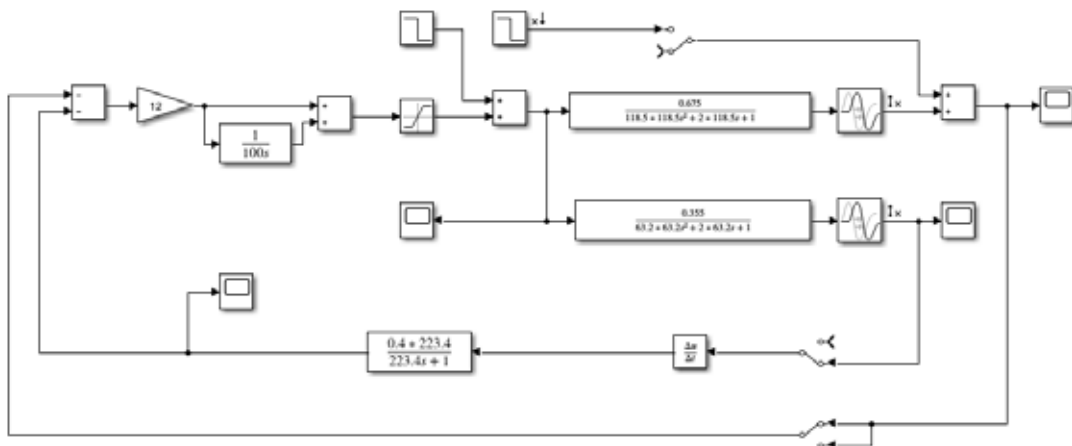


Рис. 5. АСР первинного перегріву пари з похідною у довільній точці (завдання 0)

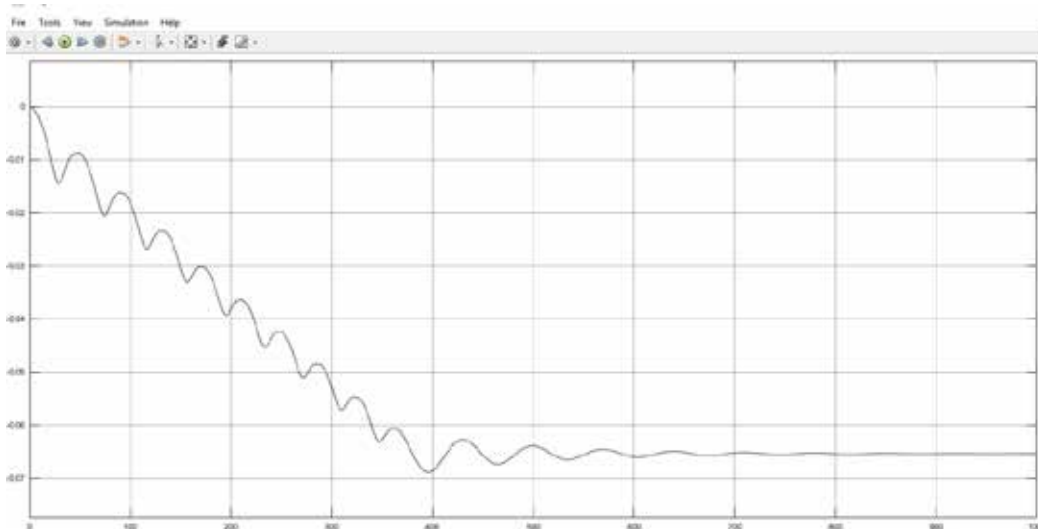


Рис. 6. Графік перехідного процесу з використанням нечіткого регулятора

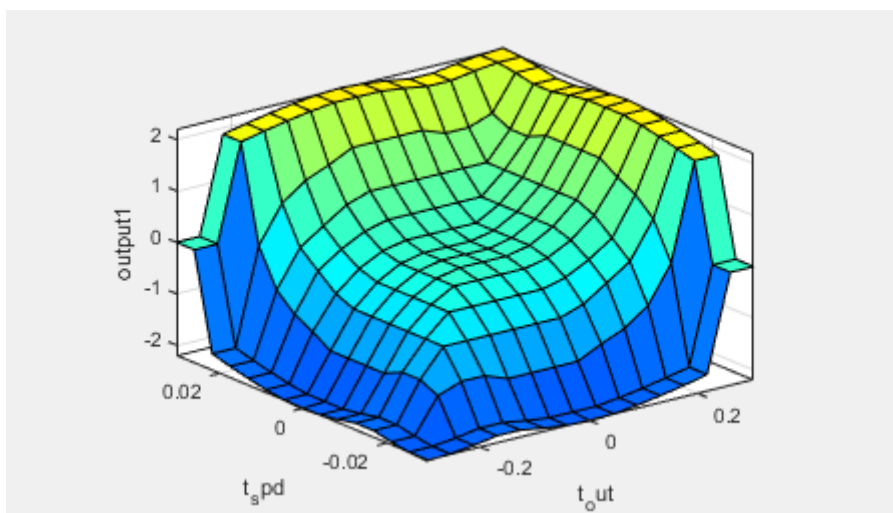


Рис. 7. Простір правил нечіткого регулятора

Після того як ми подали сигнал по каналу збурення, у нас з'явився графік перехідного процесу.

Ми інтегрували у нашу схему нечіткий регулятор. Налаштували методом послідовного наближення та отримали такі результати.

**Висновки.** Підтримка необхідної величини температури перегріву пари має важливе значення для забезпечення надійної роботи паросилових установок.

Найбільш поширеним способом регулювання температури перегріву пари є охолодження перегрітої пари вприскуванням живильної води або власного конденсату. Ми порівняли дві системи регулювання первинного перегріву пару з введенням похідної у довільній точці та нечітким регулятором. Та дійшли висновку що класичний регулятор ПІ із похідною введеною в довільній точці справляється краще зі своєю задачею.

#### Список літератури:

1. Д.Я. Кузьменко. Регулювання і автоматизація парових котлів. Москва : Енергія, 1978. 45 с.
2. Плетньов Г.П. Автоматичне регулювання і захист теплоенергетичних установок електростанцій. Москва : Енергія, 1976. 76 с.
3. Кон Л.Й. Методичні вказівки й таблиці для вибору налаштувань ПІ та П регуляторів в одноконтурних системах регулювання теплових об'єктів з запізненням. Одеса : ОНПУ, 2003. 127 с.
4. Леоненков А.Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech. Санкт-Петербург : БХВ, 2003. 720 с.

5. Мелихов А.Н. и др. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. Москва : Наука, 1990. 272 с.
6. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. Москва : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2013. 798 с.
7. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под. ред. Д.А. Поспелова. Москва : Радио и связь, 1982. 490 с.
8. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р.Р. Ягера. Москва : Радио и связь, 1986. 408 с.
9. Васильев В.И. Интеллектуальные системы управления: теория и практика. Уфа : УГАТУ, 2007. 446 с.
10. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2001. 201 с.

**Khil V.V. PORTIVE CLASSIC AUTOMATIC SYSTEMS FOR REGULATING THE FIRST OVERLOOKING OF THE STEAM WITH THE INPUTED STEADY AT THE ADVANCED REGULATOR WITH AN INACCURATE REGULATOR**

*Nowadays, almost all production processes are automated. Which in turn positively contribute to production, cost reduction and product quality improvement. Reduces the number of personnel involved in the maintenance of this process and increases the reliability and durability of machines. In terms of automation, thermal power is one of the key places among other industries. Power plants are characterized by a large number of continuous processes occurring in them. In this case, the generation of electrical and thermal energy must correspond to the load. Almost all operations on thermal power plants are automated.*

*The task to be further considered is common in the practice of regulating the temperature of superheated steam in superheaters of power units. Debugging such systems is complicated by high requirements for the quality of transients, especially for the first dynamic deviation. Indeed, if under the influence of perturbations there is an excessive overheating of the metal of the superheater, then there will be conditions for the loss of the necessary strength. The result can be a leak of steam from the superheater and an emergency.*

*Maintaining the temperature of superheated steam is important to ensure reliable operation of steam plants. The most common way to control the temperature of superheated steam is to cool the superheated steam by injecting feed water or its own condensate.*

*A gas-steam heat exchanger is used to regulate the overheating of the secondary steam. To protect against excessive overheating of the pipes of the output package at low loads in the circuit of the cooler – there is an emergency injection, which is not used during normal operation of the boiler.*

*This paper presents an example with temperature control at a given level where an automatic control system of primary steam overheating with the introduction of a derivative at an arbitrary point is used. We compare it with a system in which this system is regulated by a fuzzy regulator.*

**Key words:** *superheater; superheated steam, primary steam overheating, automatic control system, convective superheater, economizer, hot air, fuzzy logic, regulator, transient control process.*

**Чернишов К.А.**

[orcid.org/0000-0002-8639-2732](https://orcid.org/0000-0002-8639-2732)

Вінницький національний технічний університет

**Майданюк В.П.**

Вінницький національний технічний університет

**Арсенюк І.Р.**

[orcid.org/0000-0003-4045-6144](https://orcid.org/0000-0003-4045-6144)

Researcher ID \* T-9166-2017

Вінницький національний технічний університет

## ПРИНЦИПИ ПРОЕКТУВАННЯ СУЧАСНИХ ВЕНДИНГОВИХ СИСТЕМ

*Розкрито принципи проектування сучасних вендингових систем. Запропоновано генезис торгових автоматів та описано різновиди їх застосування. Наведено основні види вендингових автоматів та їх устаткування. Описано принципи застосування вендингових систем у різних країнах світу. Запропоновано огляд можливих станів вендингової системи та переходи між ними. Охарактеризовано універсальний дизайн сучасного вендингового автомату, в якому відокремлено апаратні та програмні компоненти. Підкреслено важливість управління оператором та запропоновано перелік основних дій, таких як: слідкування за (повторним) наповненням, очищенням та функціональною ефективністю торгового автомата, а також за ефективністю корпусу, збирання асортименту та прийняття рішення щодо платіжної системи. Наведено схему плати вводу-виводу вендингового автомату з відокремленням фундаментальних складових. Визначено ланки з'єднання між компонентами всередині плати розширення вендингового автомату. Схематично представлено програмний стек вендингової системи, який дає наочне уявлення про функціональну складову частину вендингової системи. Архітектура програмного забезпечення еталонного дизайну абстрагує торговий ввід-вивід, що дозволяє виробникам вендингових автоматів сконцентруватися на додатках високого рівня та на тому, що відображається на екрані. Зазначається, що даний факт досягається за допомогою двох типів API: API низького рівня для доступу до певних торгових протоколів вводу-виводу та API високого рівня для доступу до периферійного типу, не вимагаючи від програмістів знання деталей фактичного пристрою. Підкреслено, що високий рівень API спрощує написання вендингової програми та може дозволити торговим операторам використовувати одну програму на всьому їх парку машин, а також обробляє зміни в протоколах, таких як MDB, і забезпечує додаткову гнучкість для адаптації до незначних змін у протоколах шини, що потрібно, коли виробники периферійних пристроїв відхиляються від стандартних специфікацій.*

**Ключові слова:** вендинг, система, керування, моніторинг, Інтернет речей, контролер, протокол.

**Постановка проблеми.** Вендинг та цифрова ера Інтернет прискорює темпи інновацій та трансформує ринки, провідну роль серед яких займає вендингова галузь. Одним із прикладів цього є Інтернет речей (IoT), який використовує сучасні ізольовані системи та підключає їх до Інтернету – тенденція, яка вже існує для торгових автоматів. Усі вендингові машини можуть бути підключені до Інтернету, мати доступ до соціальних мереж і стати справжньою периферією, що взаємодіє в Інтернеті. У майбутньому торгові автомати матимуть значно більшу кількість функцій, пропонуючи додаткові послуги користувачам. Для виробників продуктів та операторів ця нова реальність

пропонує можливості для фінансового зростання, видимості бренду, залучення клієнтів та скорочення операційних витрат. Переважну більшість машин сконструйовано з контролером торгових автоматів (VMC), який управляє багатьма основними підсистемами, такими як оплата, управління охолодженням та освітленням, обробка монет та продуктів тощо. Оскільки VMC, як правило, базується на мікроконтролері низького класу, йому не вистачає обчислювальної потужності, підключення, безпеки, керованості та простоти перепрограмування, необхідних для підтримки нових служб після встановлення, таких як запуск програм лояльності та маркетингові кампанії.



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

В останні кілька років чимало як зарубіжних, так і вітчизняних вчених здійснило відкриття у сфері сучасних вендингових систем.

А.М. Сало [1] дослідила принципи побудови вендингової мережі з моніторингом, автором пропонується комп'ютерна система керування вендинговим автоматом. У роботі детально описано процес взаємодії вендингового автомата із серверною системою. Також авторкою розглянуто особливості роботи вендингових кіберфізичних систем після тривалої експлуатації. Проаналізовано вже готові способи масштабування кіберфізичних систем. Визначено основні недоліки та переваги переходу вже готової системи на платформу стороннього розробника. Запропоновано способи оптимізації баз даних із великою кількістю інформації [2].

Н.І. Горбаль, З.Ю. Келлер та М.Б. Найчук-Хрущ [3] проаналізували актуальність вендингового стартапу на вітчизняному ринку та навели основні сегменти вендингу в Україні. Розглянули основні переваги при впровадженні такого стартапу для підприємця. Навели бар'єри входу на ринок і виділили приблизний розмір необхідного стартового капіталу.

О.Л. Котвицький [4] розробив модуль безготівкової оплати системи самообслуговування. Розглянено існуючі системи. Показано узагальнений режим роботи модулю безготівкової оплати та його структуру.

Із зарубіжних авторів варто відмітити роботи Vennan Sibanda, Lorraine Munetsib, Khumbulani Mprofua, Eriyeti Murenaa, John Trimblea [5], Lee E. A. та Seshia S. A. [6], Hua S.V., Ickovics J.R. [7], Gruber S. [8], Donald W. [9] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки за темою, питання дослідження принципів проектування сучасних вендингових систем залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Мета статті – здійснити огляд принципів проектування сучасних вендингових систем.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Перший торговий автомат був побудований Героном Олександрійським (Механік, близько 100 р. до н. е.). Після вставлення в нього монети розливалася свята вода. Більше 100 років люди не могли купувати товари та послуги у торгових автоматах. Перші вендингові автомати були побудовані в кінці 80-х років XIX століття. 13 березня 1908 року перед готелем Des Postes було встанов-

лено перший у світі торговий автомат із марками та листівками.

Вендингові автомати використовуються на різних ринках, у роздрібній торгівлі для продажу продуктів харчування та непродовольчих товарів, а також товарів першої необхідності. Раніше продаж холодних та гарячих напоїв був переважним бізнесом, але в даний час різноманітність товарів та послуг, що продаються за допомогою вендингових автоматів, неухильно зростає. Вендингові асоціації в різних країнах визначають вендинг по-різному.

В основному вендинг визначається як продаж продуктів через торгові автомати, які є «монетними автоматами для продажу дрібних предметів». Крім того, торгові автомати можуть бути розроблені для продажу великої кількості різноманітних продуктів, наприклад, в Японії можна придбати десять кілограмових мішків рису з торгового автомату. Крім того, протягом декількох років можна оплачувати товари та послуги кредитною картою, яку потрібно помістити у слот торгового автомата для карток.

Американська асоціація NAMA (Національна асоціація автоматичних товарів) заявляє, що «венд – це доставка однієї одиниці товару». У США торгівля тісно пов'язана із гаслом «Кава, цукерки, кола». «Кава» символізує продаж гарячих напоїв, таких як кава, гарячий шоколад, чай, але також супів; термін «цукерки» означає солодощі, а «кола» замінює перелік різних безалкогольних напоїв. На самому початку вендингова індустрія почала з концепцією 4 позицій: кава, газована вода, цукерки та сигарети, а пізніше асортимент зріс майже до 8: кава, цукерки чи кондитерські вироби, чіпси, холодні напої, консервовані напої, сигарети та чай.

В Європі вендинг включає ширший асортимент товарів (EVA, Європейська асоціація вендингу). Вендингова асоціація в Німеччині (BDV, Bundesverband der Deutschen Vending AutomatenWirtschaft e.V.) визначає вендинг як продаж повсякденних товарів першої необхідності, особливо продуктів харчування та напоїв через торгові автомати [10]. Виробники машин, оператори та різні асоціації використовують термін торг для всіх видів їжі та напоїв, але вони включають і непродовольчі товари.

Австрійська асоціація (ÖVV, Österreichische Verkaufsautomaten Vereinigung) визначає всі машини, що продають товари, включаючи їжу, напої, фотографії, квитки на парковку як торгові автомати; але також включають копіювальні

машини, телефони, шафки, пральні машини, кульки, ігрові автомати тощо.

Із точки зору маркетингу торгові автомати визначаються як формат магазину роздрібної торгівлі з автоматичною процедурою продажу – клієнт повинен вибрати товар, взяти його з собою та заплатити за нього.

У США торговий автомат використовує повну скляну фасадну частину, щоб продати товарний асортимент всередині машини. Найчастіше продукт доставляється за допомогою спіралей і дозується в піддон для подачі, розташований внизу машини.

Вендинг визначається як продаж товарів або послуг торговим автоматом, на якому клієнт повинен керувати вибором товару або послуги, забрати товар і вивезти його та заплатити за товар або послуга на місці – готівкою, кредитною картою або за допомогою інших доступних в електронному вигляді способів оплати, наприклад текстового повідомлення.

На вендинговому ринку можна виділити чотири групи гравців:

– виробники торгових автоматів, аксесуарів та товарів, а також постачальник послуг,

- орендодавці сайту,
- оператор (мерчендайзери та люди, що обслуговують),
- клієнти.

Окрім технічних функцій (енергопостачання, водопостачання, розподіл та платіжна одиниця), при розробці торгових автоматів слід враховувати маркетингові аспекти (наприклад, аксесуари, такі як ложки, чашки, серветки). Враховуючи високі витрати на технічне обслуговування та сильний вплив функціональної ефективності на задоволеність споживачів, технічне обладнання та платіжна система, а також комфорт розподілу дуже важливі. Тому особливості обробки повинні бути ретельно розроблені, особливо для захисту торгових автоматів від вандалізму чи технічних поломок. Огляд можливих станів вендингової системи та переходи між ними наведено на рис. 1.

Товари та аксесуари повинні відповідати як технічним вимогам торгових автоматів (розмір, довговічність, керованість), так і потребам клієнтів (привабливість, просте відкриття, щоб забрати вибрані товари тощо). Упаковка повинна гарантувати, що товар не зламається і не прилипне до спіралі при виборі та доставці.

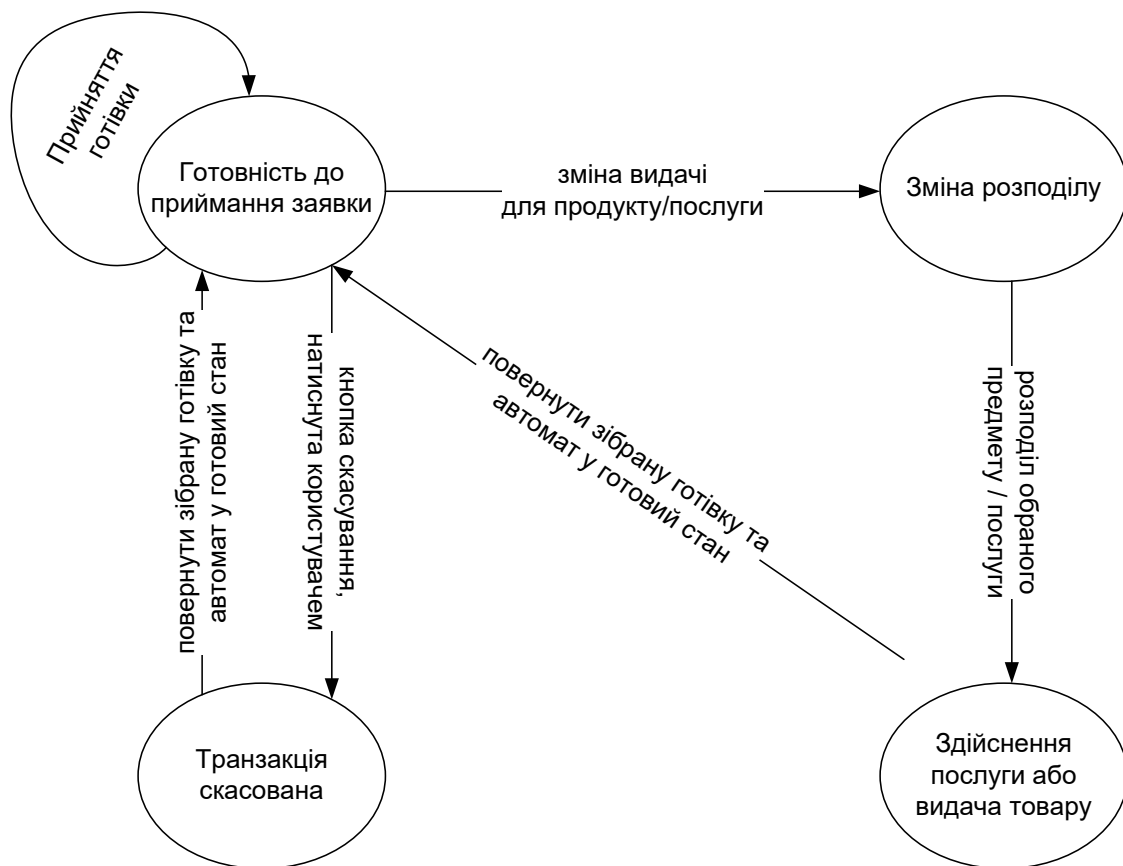


Рис. 1. Переходи між станами вендингової системи

Джерело: розробка автора на основі [11]

Оператор повинен стежити за (повторним) наповненням, очищенням та функціональною ефективністю торгового автомата, а також за ефективністю корпусу. Зазвичай оператор збирає асортимент і приймає рішення щодо платіжної системи (готівка, кредитна картка, Інтернет, обмін текстовими повідомленнями тощо).

Оператор повинен знати потреби та ставлення споживачів. Без будь-яких даних про профілі клієнтів, хто купує коли, що, у якій кількості, неможливо зробити висновок з обороту на реальні побажання та потреби клієнтів. Цей брак інформації є однією з головних проблем вендингового бізнесу. Таким чином, клієнт залишається сам при покупці з торгового автомата, а оператор дуже часто не знає занадто багато про мотиви та ставлення клієнта. Загалом можна стверджувати, що, з точки зору замовника, імідж цього каналу розповсюдження повинен бути покращений.

Орендодавець сайту є власником або орендарем місця, де встановлено торговий автомат. Він / вона здає це місце оператору та отримує за це гроші. Зазвичай торгові автомати можна знайти на трьох різних ринках:

- бізнес-ринок (офіс, фабрика, хірургія тощо);
- ринок громадського харчування (ресторан, кафе, кіоск тощо);
- громадський ринок (громадська будівля, школа, університет, торговий центр, спортивний центр, залізничний вокзал, аеропорт, вулиця тощо).

Клієнт вибирає товари з торгового автомата, оплачує їх готівкою, кредитною картою або іншими способами та бере товар з підрозділу доставки для подальшого споживання.

Покупка в торговому автоматі може розглядатися як особлива ситуація покупки. Клієнт не може просити про допомогу, і він / вона робить покупку сам без будь-якої поради продавця. Якщо процедура продажу діє добре, клієнта обслуговують досить швидко. У разі виникнення проблеми він / вона повинен з'ясувати, як впоратися із ситуацією. Зазвичай номер телефону оператора пишеться на знаку, який наклеюється на торговий автомат. Тобто клієнт повинен здійснити і оплатити телефонний дзвінок, і в ідеалі проблему можна вирішити негайно. Якщо клієнт хоче поскаржитися на якість товару, комфорт поводження з підрозділом доставки або щось інше, спочатку він / вона повинен з'ясувати, як він / вона може зв'язатися з контактною особою. Ситуація з покупкою характеризується непрямим спілкуванням, активним

пошуком інформації та ризиком покупця піти з невирішеною проблемою. З іншого боку, конкретна ситуація купівлі також може сприйматися позитивно. Клієнт може вибрати, забрати товар і оплатити, не порушуючи та не маніпулюючи продавцем.

Вендинг – це частина нашого життя. Цілодобово пропонуються різні товари, наприклад фотографії для паспортів, візитних карток, квитків на паркування, презервативи, сигарети, солодощі, їжа, гарячі та холодні напої. На інших вендингових системах є можливість грати у відеоігри, робити копії, прати одяг, телефонувати, грати в азартні ігри тощо.

Вендингові автомати можна класифікувати на орієнтовані на продукцію та сервісні машини. Орієнтовані на товар торгові автомати – це машини, що пропонують як холодну, так і гарячу їжу, а також непродовольчі товари. До цієї категорії належать машини для здійснення пакування, де клієнт надає гроші за товар.

Сервісно-орієнтовані торгові автомати пропонують різні види послуг, розваги (наприклад, музичні автомати, ігрові автомати) та не розваги (наприклад, телефон або послугу зважування).

Референтний дизайн для інтелектуальних вендингів пропонує універсальну архітектуру традиційних торгових автоматів у високопродуктивній, підключені до Інтернету машини. Виробники торгових автоматів можуть використовувати еталонний дизайн для проектування майбутніх машин або для модернізації існуючих. Універсальний дизайн містить кілька апаратних та програмних компонентів, серед яких:

### 1. Обчислювальна система.

Платформа на базі високопродуктивного процесора із платою Vendor-managed inventory (VMI) замінює традиційні контролери торгових автоматів (VMC), забезпечуючи таким чином машини з дротовим Ethernet або широкосмуговим бездротовим підключенням до зовнішнього світу та обчислювальну потужність, необхідну для розгортання нових послуг.

Виробники торгових автоматів можуть вибрати два масштабовані сімейства процесорів, які можуть запускати один і той же код (тобто забезпечуючи зворотну сумісність) і мають технічну підтримку на всіх рівнях реалізації (ISV).

Процесори Intel Core та vPro забезпечують найвищу продуктивність для мультимедійних та обчислювальних завдань, включаючи цифрові вивіски високої чіткості, аналіз даних та управління вмістом. Вони також підтримують Intel

Active Management Technology (Intel AMT), можливість віддаленого управління.

Процесори Intel Atom врівноважують обчислювальні та графічні показники, забезпечуючи чудову ціну для торгових автоматів середнього класу.

### 2. Модуль інтерфейсу вводу-виводу

Сучасні вендингові автомати використовують широкий спектр протоколів шини (наприклад, CAN, ccTalk, MDB, USB) для зв'язку між VMC та периферійними пристроями, такими як механіка управління та пристрої зчитування приміток. Універсальна архітектура сучасного вендингового апарату містить плату VMI, яка підтримує ці інтерфейси вводу-виводу та багато іншого.

Плата вводу-виводу, показана на рисунку 2, є недорогою конструкцією, що забезпечує високий рівень гнучкості вводу-виводу. Перетворення шинного протоколу здійснюється на платі VMI.

### 3. Програмний стек.

На рисунку 3 показана архітектура програмного забезпечення еталонного дизайну, що абстрагує торговий ввід-вивід, що дозволяє виробникам вендингових автоматів сконцентруватися на додатках високого рівня та на тому, що відображається на екрані. Це досягається за допомогою двох типів

API: API низького рівня (LLAPI) для доступу до певних торгових протоколів вводу-виводу та API високого рівня (HLAPI) для доступу до периферійного типу, не вимагаючи від програмістів знання деталей фактичного пристрою.

LLAPI забезпечує низькорівневий доступ до пристрою, але пов'язаний із ним код, швидше за все, буде конкретним, що ускладнить повторне використання на іншій машині. З іншого боку, HLAPI детально описує, як працює тип пристрою, але деталі зв'язку абстрагуються, що дозволяє повторно використовувати програми для інших конфігурацій машини. По суті, HLAPI спрощує написання вендингової програми та може дозволити торговим операторам використовувати одну програму на всьому їх парку машин.

HLAPI також обробляє зміни в протоколах, таких як MDB, і забезпечує додаткову гнучкість для адаптації до незначних змін у протоколах шини, що потрібно, коли виробники периферійних пристроїв відхиляються від стандартних специфікацій. Іншими словами, HLAPI дозволяє виробникам торгових автоматів робити досить прості зміни конфігурації для підтримки протоколів шини, які були модифіковані периферійними постачальниками.



Рис. 2. Плата вводу-виводу вендингового автомату

Джерело: розробка автора на основі [12]

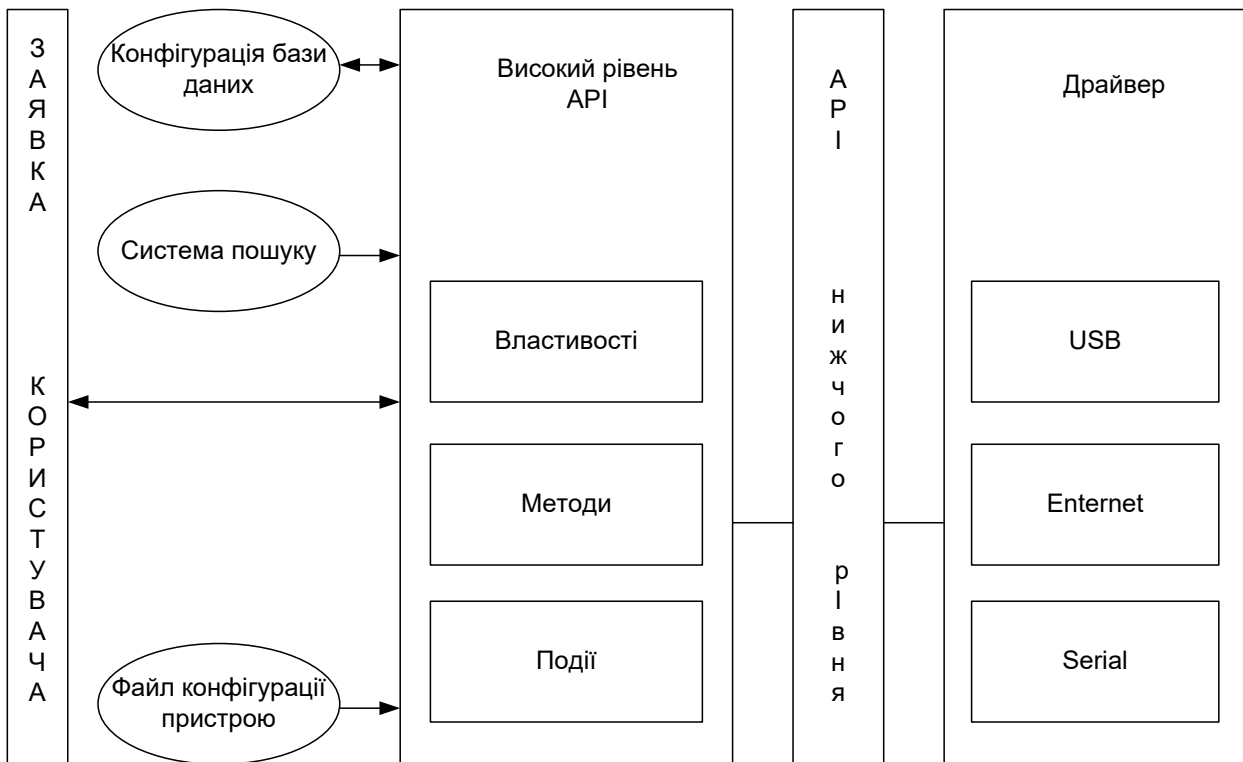


Рис. 3. Програмний стек вендингової системи

Джерело: розробка автора на основі [8]

Забезпечуючи нові бізнес-моделі, безпеку та керуваність, цей потужний набір технологій вендингової системи включає в себе:

1) систему управління вмістом (CMS): Менеджер роздрібних клієнтів дозволяє операторам торгових автоматів створювати можливості продажу, складаючи відповідні та високоефективні кампанії за лічені хвилини; не потрібні технічні знання. Повідомлення можна розгорнути на одному екрані або в мережі, а керувати екранами можна незалежно – та віддалено – з одного місця;

2) аналітику: інтегрований в RCM, додатковий набір Audience Impression Metrics Suite (AIM Suite) надає виробникам та операторам цінну інформацію про те, як клієнти торгових автоматів реагують на візуальні повідомлення та як вони взаємодіють з машиною. Програмне забезпечення агрегує статистику глядачів за статтю, віковим діапазоном, кількістю показів та часом перебування, інформацію, яку можна використовувати для відтворення рекламних оголошень та вимірювання ефективності кампанії, а також визначає втрачені продажі від клієнтів, які пішли, не зробивши покупки. Це все робиться анонімно.

3) керуваність: дозволяє консолі управління IT віддалено контролювати, діагностувати та, в багатьох випадках, віддалено виправляти пошко-

джене програмне забезпечення. Якщо торгова система виходить із ладу, попередження, що містить системну діагностику, може бути автоматично надіслане обслуговуючому персоналу, скорочуючи час простою та втрачені можливості продажу;

4) програмне забезпечення для захисту: підтримує цілісність торгових автоматів, дозволяючи запускати лише авторизований код і вносити лише дозволені зміни. Він автоматично створює динамічний білий список «авторизованого коду» в системі. Після створення та ввімкнення білого списку система блокується до відомого хорошого базового рівня, і жодна програма або код поза дозволеним набором не може працювати. Білий список допомагає запобігти виконанню вірусів, шпигунських програм та інших шкідливих програм.

**Висновки.** У роботі здійснено огляд принципів проектування сучасних вендингових систем, їх структури та архітектурної складової. Спектр вендингових автоматів масштабний, очікується подальший технологічний розвиток на вендинговому ринку. Швидкий розвиток торгових автоматів та зменшення соціальних контактів між продавцем та покупцем відображає два типи змін у нашому суспільстві: з одного боку, технічні досяг-

нення, які дозволяють пропонувати нові види продукції та забезпечують безпеку як продавця, так і клієнта, з іншого боку, потреби споживачів змінюються. Дієва відкрита архітектурна складова сучасної вендингової системи повинна забезпе-

чувати виконання потреб клієнтів та буди універсальною.

Перспективи подальших досліджень базуються на розробці моделі вендингової системи з вдосконаленим модулем обробки запитів клієнтів.

#### Список літератури:

1. Сало А.М. Принцип побудови вендингової мережі з моніторингом. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Комп'ютерні системи та мережі»*. Львів, 2013. № 773. С. 112–118.
2. Сало А.М., Загорняк В.В. Засоби оптимізації модуля адміністрування вендингових кіберфізичних систем. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Комп'ютерні системи та мережі. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2018. № 905. С. 117–124.
3. Горбаль Н.І. Келлер З.Ю., Найчук-Хрущ М.Б. Вендинговий стартап на українському ринку. *Науковий вісник НЛТУ України*. Серія економічна. 2017. Вип. 27(2). С. 53–57.
4. Котвицький О.Л. Модуль безготівкової оплати для систем самообслуговування / Національний Університет «Львівська Політехніка», кафедра електронних обчислювальних машин. URL : <http://eom.lp.edu.ua/sntk/doc/ksm2020/kotvitskiy.pdf> (дата звернення: 17.09.2020).
5. Design of a high-tech vending machine / Vennan Sibanda, Lorraine Munetsib, Khumbulani Mpfua, Eriyeti Murenaa, John Trimblea / 30th CIRP Design 2020 (CIRP Design 2020). URL : <https://pdf.sciencedirectassets.com/282173/1-s2.0-S2212827120X00096/1-s2.0-S2212827120308829/main.pdf?X-Amz-Security->
6. Lee E. A. and Seshia S. A. Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition, MIT Press, 2017. P. 9–16.
7. Hua S.V., Ickovics J.R. Vending machines: a narrative review of factors influencing items purchased. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*. 2016. Vol. 116(10). P. 1578–1588.
8. Gruber S. The commodity vending machine', IGWT Internationale Gesellschaft für Warenwissenschaften und Technologie. 2016. P. 1–11.
9. Donald W. Howell. Vending mashine monitoring system. URL : <http://patent.ipexl.com>.
10. Sheet, F. Vending Machines and Other Coin-Operated Devices, (2800158). 2017. P. 1–4.
11. Ltd G. V. In-Cup Hot Drinks – Table Top Vending Machine – GEM Vending. 2018.
12. Howard K., Davidson G., inventors; Cloverleaf Media Llc, assignee. Digital signage device. United States patent application US 29/542,226. 2017.

#### Chernyshov K.A., Maidaniuk V.P., Arseniuk I.R. DESIGNING PRINCIPLES OF MODERN VENDING SYSTEMS

*The principles of designing modern vending systems are revealed. The genesis of vending machines is proposed and the types of their application are described. The main types of vending machines and their equipment are given. The principles of application of vending systems in different countries of the world are described. An overview of possible states of the vending system and transitions between them is offered. The universal design of a modern vending machine is characterized, in which hardware and software components are separated. The importance of operator management is emphasized and a list of basic actions is proposed, such as: monitoring the (re) filling, cleaning and functional efficiency of the vending machine, as well as the efficiency of the case, assembling the range and deciding on the payment system. The scheme of the I / O board of the vending machine with the separation of the fundamental components is given. The connection links between the components inside the vending machine expansion board have been identified. The software stack of the vending system is schematically presented, which gives a clear idea of the functional component of the vending system. The architecture of the reference design software abstracts commercial I / O, allowing vending machine manufacturers to focus on high-end applications and what is displayed on the screen. It is noted that this fact is achieved through two types of APIs: low-level API for access to certain trade I / O protocols and high-level API for access to peripheral type, without requiring programmers to know the details of the actual device. It is emphasized that the high level of API simplifies the writing of the vending program and can allow retailers to use a single program throughout their fleet, as well as process changes in protocols such as MDB, and provide additional flexibility to adapt to minor bus protocol changes when peripheral manufacturers deviate from standard specifications.*

**Key words:** vending, system, management, monitoring, Internet of Things, controller, protocol.

*Шілінг А.Ю.*

Національний університет «Львівська політехніка»

## АРХІТЕКТУРА ОНЛАЙН-СИСТЕМИ РЕКОМЕНДАЦІЙ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ В ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Метою роботи є архітектура онлайн-системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу в закладах вищої освіти. У статті встановлено, що розробка онлайн-системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу, яка може існувати як самостійний елемент, або як частина платформи для дистанційного навчання, є актуальною в умовах пандемії Covid-19. Запропонована інформаційна система рекомендацій ґрунтується на основі комплексної інформаційної системи оцінювання знань споживачів освітніх послуг у закладах вищої освіти. У статті встановлено, що використання онлайн-системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу дає можливість оптимізувати процес перевірки знань споживачів освітніх послуг та процес прийняття управлінських рішень із боку закладу вищої освіти для підвищення якості навчально-методичного матеріалу та навчального процесу. Запропонована онлайн-система є відображенням «зворотного зв'язку» між учасниками освітнього процесу. У роботі запропоновано архітектуру та функціональну структуру онлайн-системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу в закладах вищої освіти. Діаграма потоку даних комплексної інформаційної системи для удосконалення навчального процесу описує функціонування програмних агентів процедур, а саме Агента реєстрації користувача в системі, Агента вибору предмета для оцінювання, Агента тестування та опрацювання його результатів, що дає можливість сформулювати предметні рекомендації щодо підвищення якості навчально-методичного матеріалу дисциплін. Результати дослідження використовуються і можуть бути використані для формування рекомендацій для удосконалення навчального процесу в закладах вищої освіти на основі оцінювання знань споживачів освітніх послуг, ефективної адаптації навчального процесу в закладах вищої освіти, а також для регулярного тестування робітників навчальними установами та організаціями.

**Ключові слова:** архітектура онлайн-системи, функціональна структура системи, діаграма потоків даних, програмний агент, навчальний процес.

**Постановка проблеми.** Основним осередком надання освітніх послуг на сьогодні є заклади вищої освіти (ЗВО). Загалом, освітня послуга трактується як кінцевий результат процесу планування та надання цих послуг. Саме тому запропонована онлайн-система рекомендацій для удосконалення навчального процесу в закладах вищої освіти орієнтована на підтримку основних форм впровадження освітніх послуг у навчальний процес. Однак на сьогодні можливість швидко адаптуватися до світових вимог функціонування для закладів вищої освіти є основним критерієм його конкурентоспроможності та ефективної діяльності на ринку освітніх послуг [1; 2]. Зокрема, аналіз рейтингів серед пошукових запитів, за даними сервісу <https://trends.google.com.ua/> у 2018-2020 рр. (Рис. 1), показує тенденції зростання інтересу із часом термінів, які пов'язані із процесом он-лайн навчання та, відповідно і оцінювання знань споживачів освітніх послуг.

Показники інтересу з часом показують популярність пошукового терміну відносно найвищого значення для певного періоду часу. Причому 100 – це пік популярності терміну; 50 означає, що популярність терміна вдвічі менша; 0 означає, що не вистачає даних про цей термін.

Отже, спостерігається тенденція збільшення показника інтересу із часом у пов'язаних пошукових темах, що зумовлено досвідом застосування певних професійних знань, умінь та навичок у різних сферах діяльності.

Розробка архітектури онлайн-системи, яка має на меті лише оцінювання знань споживачів освітніх послуг та формування рекомендацій на основі статистичних даних, робить цю систему більш універсальною. Вона може застосовуватися як окремо для оцінювання знань споживачів освітніх послуг і удосконалення викладання навчальних курсів, так і як доповнення до наявної системи дистанційного навчання.

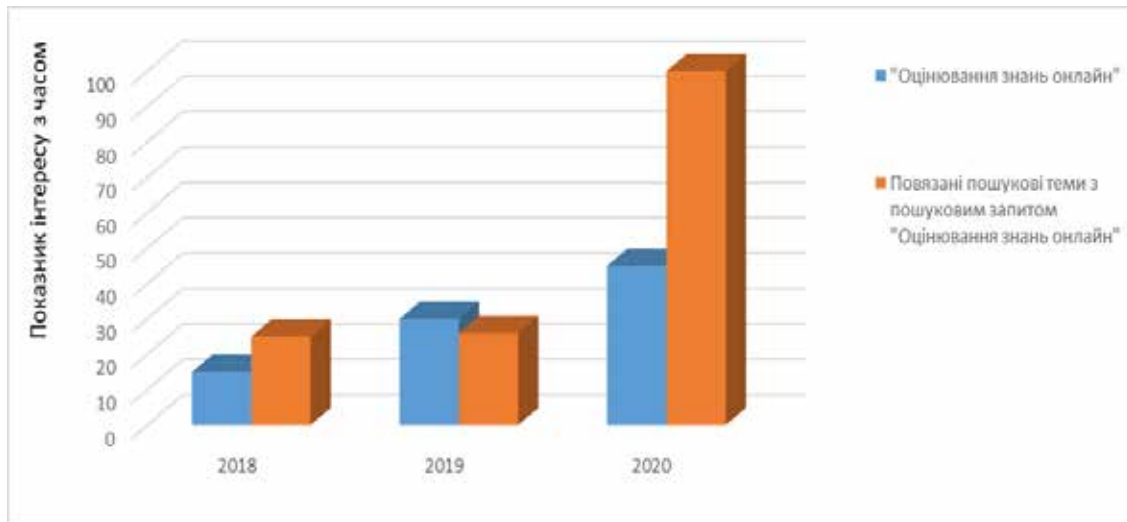


Рис. 1. Показники інтересу із часом популярних пошукових запитів за даними сервісу <https://trends.google.com.ua/> за період 2018–2020 рр.

**Постановка завдання.** Метою статті є архітектура онлайн-системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу дисциплін у закладах вищої освіти, що є основою для проведення якісного освітнього процесу та ефективного функціонування закладу вищої освіти на ринку освітніх послуг.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Сьогодні існує декілька напрямків вивчення архітектури інформаційних систем, зокрема для ефективної діяльності закладів вищої освіти.

Аналіз процесу розвитку архітектури інформаційних систем, а також вказівки та правила розробки, представлення та розуміння архітектури інформаційних систем розглядаються в роботах [3–5]. Зокрема, визначено, що розробка архітектури інформаційних систем повинна складатися із п'яти етапів, таких як етап планування та проектування, етап оперативного аналізу, етап аналізу вимог, фаза аналізу функцій, фаза фізичного синтезу. Рекомендації для розробки та вдосконалення інформаційних технологій і систем підтримки організаційних цілей для підвищення їх конкурентоспроможності сформовано в роботах [6–8].

Оскільки переважно більшість ЗВО сьогодні можна розглядати як трудомісткі та людські організації, тому архітектури інформаційних систем як важливих інструментів підтримки декількох різних інституційних освітніх процесів та надання користувачам відповідних даних розглядаються в роботах [9–11]. Зокрема, в роботі [12] описана розробка інформаційної системи для прогнозування контингенту студентів для ЗВО.

Референтна модель для закладів вищої освіти на шляху до єдиної інформаційної системи опи-

сана в роботах [13; 14] та має на меті об'єднання різномірних інформаційних систем та додатків для ефективного та конкурентоспроможного існування ЗВО на ринку освітніх послуг. Зокрема, в роботах [15; 16] предметом дослідження є використання автоматизованих систем управління в навчальному процесі та розробка комп'ютерних навчальних програм.

Концепція створення і використання інформаційного порталу тестування та оцінювання знань як одного з перспективних напрямків для розвитку та побудови віртуальних освітніх середовищ у сучасному освітньому просторі розглядається в роботі [17].

Але жодне з досліджень не розглядає можливості розробки інформаційної системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу на основі оцінювання знань споживачів освітніх послуг, яка може функціонувати як додатковий елемент середовища для навчання або як самостійна система для оцінювання знань. Саме тому основним завданням цієї статті є побудова архітектури онлайн-системи для вдосконалення навчального процесу в закладах вищої освіти ефективного функціонування ЗВО на ринку освітніх послуг та для прийняття управлінських рішень із боку ЗВО для забезпечення якості засвоєного навчального матеріалу.

#### Виклад основного матеріалу.

### 1. Архітектура онлайн-системи для вдосконалення навчального процесу в закладах вищої освіти

Архітектура онлайн-системи для вдосконалення навчального процесу в закладах вищої освіти побудована на основі оцінювання знань споживачів освітніх послуг у ЗВО (Рис. 2).



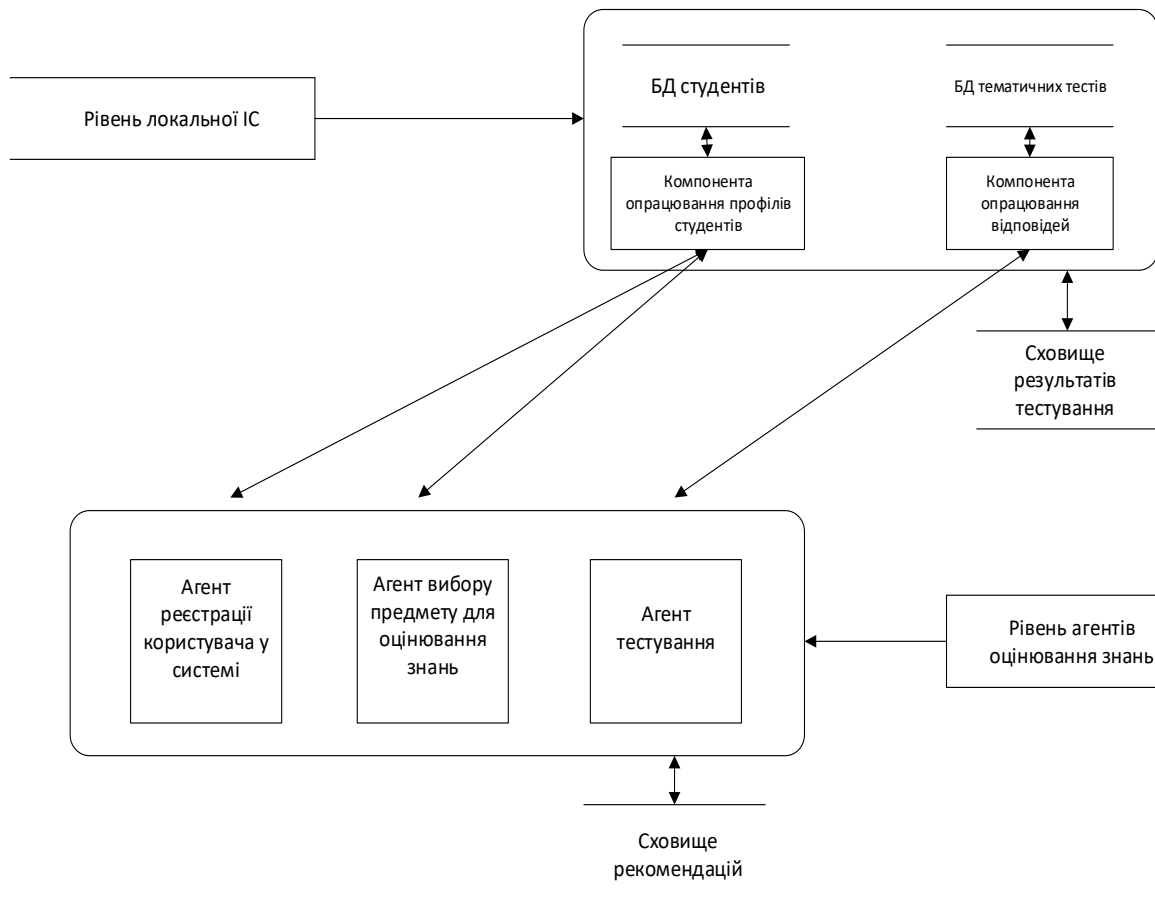


Рис. 2. Архітектура інформаційної системи оцінювання знань споживачів освітніх послуг у ЗВО

Особливістю такої комплексної інформаційної системи оцінювання знань споживачів освітніх послуг у ЗВО є її функціонування на двох архітектурних рівнях:

- 1) рівень локальної інформаційної системи;
- 2) рівень агентів оцінювання знань споживачів освітніх послуг.

На першому рівні здійснюється робота з базами даних користувачів системи та тематичних тестів, яка забезпечує:

- формування необхідних елементів контрольного навчально-методичного інформаційного наповнення та профілів студентів ЗВО;
- визначення процесу реєстрації користувача та збереження його даних;
- задання параметрів вибору тематичного тестування та долучення студента до нього.

На другому рівні функціонують програмні агенти оцінювання знань, які призначені для:

- реєстрації користувача у системі;
- збереження профілів користувачів;
- вибору предмету для оцінювання знань;
- проведення процесу тестування;
- співставлення обраних користувачем відповідей із правильними;

- збереження результатів тестування;
- моніторингу якості навчального процесу та формування рекомендації відповідно до результатів тестування споживачів освітніх послуг.

## 2. Розробка функціональної структури онлайн-системи рекомендацій для вдосконалення навчального процесу на основі оцінювання знань споживачів освітніх послуг у ЗВО

Функціональна структура онлайн-системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу побудована на основі до архітектури відповідної комплексної інформаційної системи.

Контекстна діаграма комплексної онлайн-системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу у ЗВО подана на рис. 3.

Діаграма потоків даних комплексної онлайн-системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу у ЗВО подано на Рис. 4. У ній виділено такі функції:

1. Агент реєстрації користувача в системі.
2. Агент вибору предмету для оцінювання знань.
3. Агент тестування.
4. Результати тестування.
5. Формування рекомендацій.

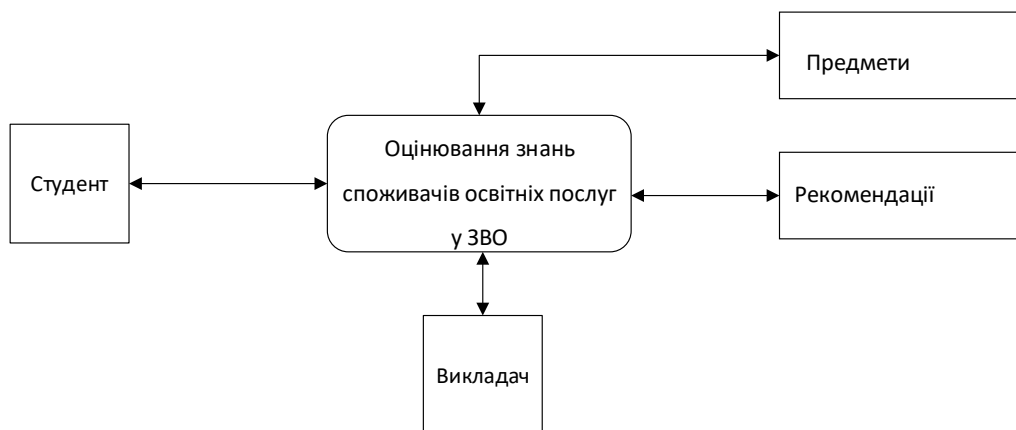


Рис. 3. Контекстна діаграма комплексної онлайн-системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу у ЗВО

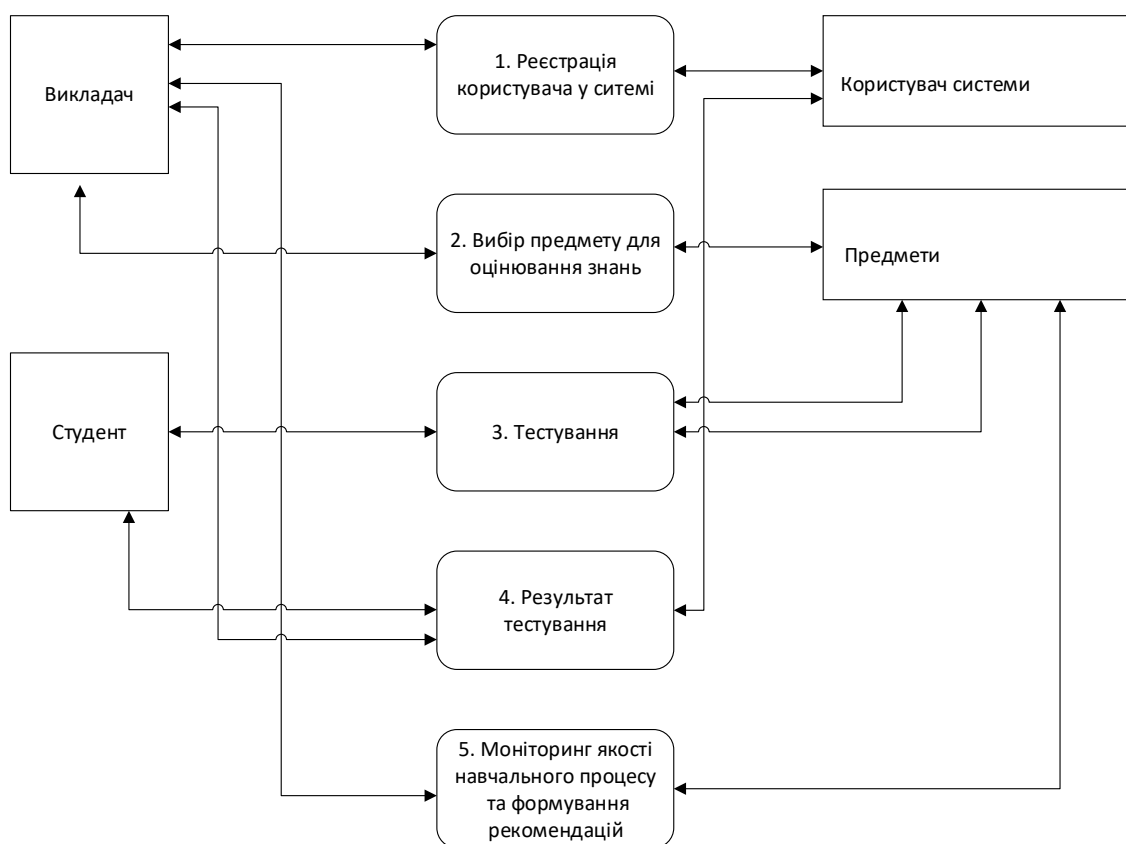


Рис. 4. Діаграма потоків даних комплексної онлайн-системи рекомендацій для удосконалення навчального процесу у ЗВО

Агент реєстрації користувача в онлайн-системі удосконалення навчального процесу у ЗВО складається з функцій (Рис. 5):

- введення даних для реєстрації користувача;
- перевірки даних користувача;
- формування профілю користувача.

Агент вибору предмета для оцінювання споживачів освітніх послуг у ЗВО (Рис. 6) містить такі функції, як:

- вибір тематичного тестування;

– приєднання користувача до тематичного тестування;

- збереження предмету для користувача.

Агент тестування споживачів освітніх послуг в онлайн-системі удосконалення навчального процесу у ЗВО містить такі функції (Рис. 7):

- процес тестування;
- співставлення отриманих відповідей із правильними;
- збереження відомостей;

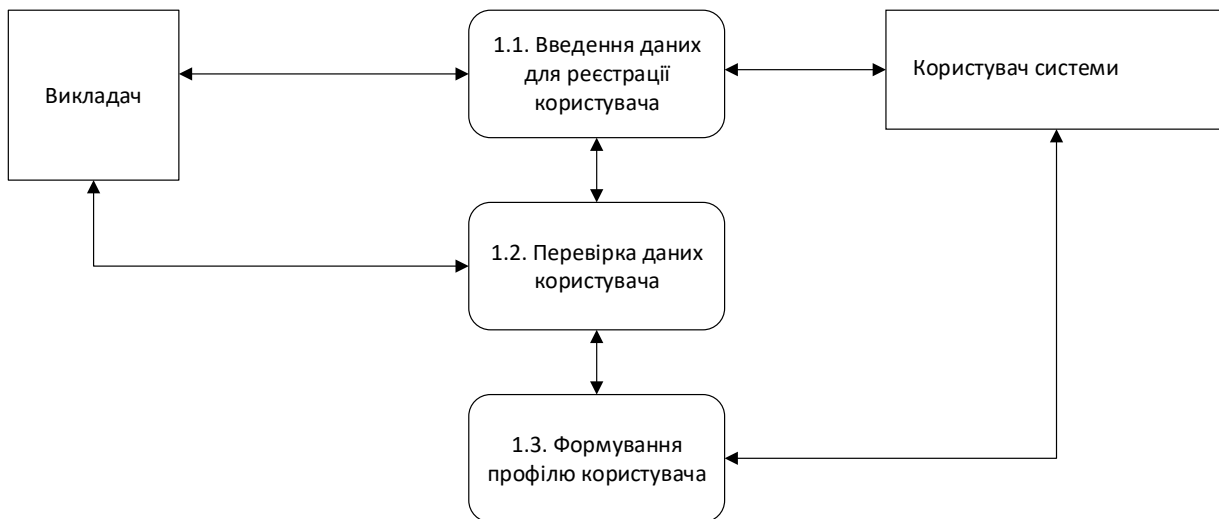


Рис. 5. Діаграма потоків даних Агента реєстрації користувача в онлайн-системі вдосконалення навчального процесу у ЗВО

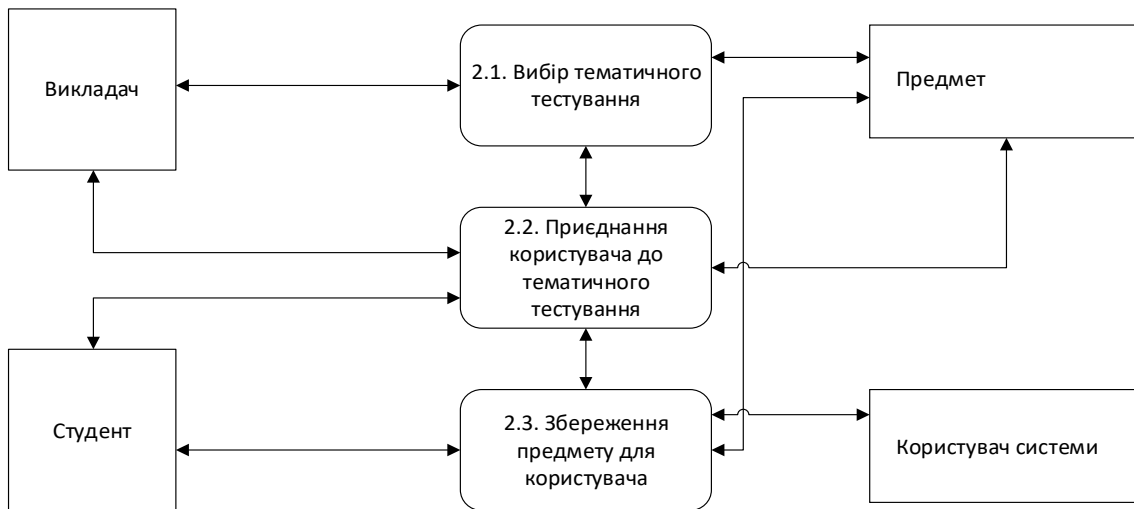


Рис. 6. Діаграма потоків даних Агента вибору предмета для оцінювання споживачів освітніх послуг в онлайн системі удосконалення навчального процесу у ЗВО

- оцінка за тестування.

Агент результатів тестування знань споживачів освітніх послуг в онлайн-системі удосконалення навчального процесу у ЗВО включає такі функції (Рис. 8):

- оцінка за тестування;
- аналіз рівня засвоєння навчального матеріалу;
- експорт результатів тестування.

Моніторинг якості навчального процесу та формування рекомендацій містить такі особливості (рис. 9):

- аналіз навчально-методичного контенту дисциплін;
- аналіз результатів тестування;
- аналіз відповідності змісту навчального

контенту дисципліни відповідно до освітньої програми;

- аналіз недоліків.

### 3. Аналіз результатів

Оскільки архітектура онлайн-системи для вдосконалення навчального процесу в закладах вищої освіти побудована на основі оцінювання знань споживачів освітніх послуг у ЗВО, інформативними показниками є результати оцінювання знань споживачів освітніх послуг у ЗВО. Для аналізу результатів оцінювання знань споживачів освітніх послуг використано ресурс Віртуального навчального середовища Національного університету «Львівська Політехніка» (<http://vns.lpnu.ua>), зокрема дисципліни «Інформаційний менеджмент та маркетинг» та «Розподілені інформаційні сис-

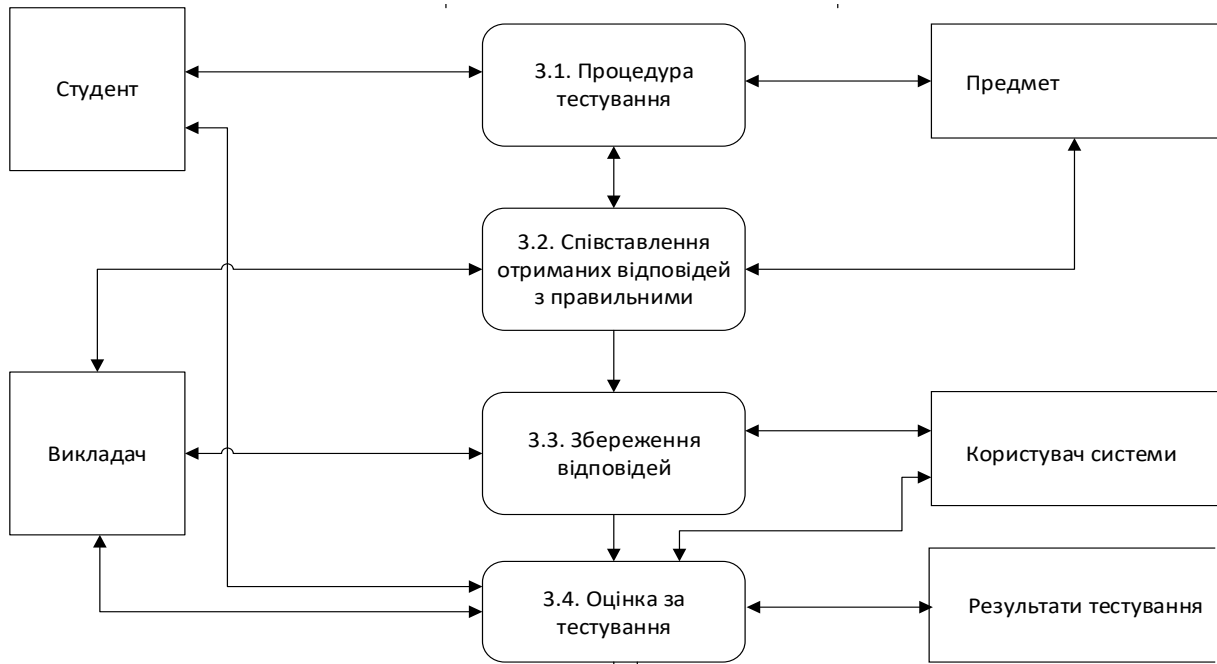


Рис. 7. Діаграма потоків даних Агента тестування споживачів освітніх послуг в онлайн системі удосконалення навчального процесу у ЗВО

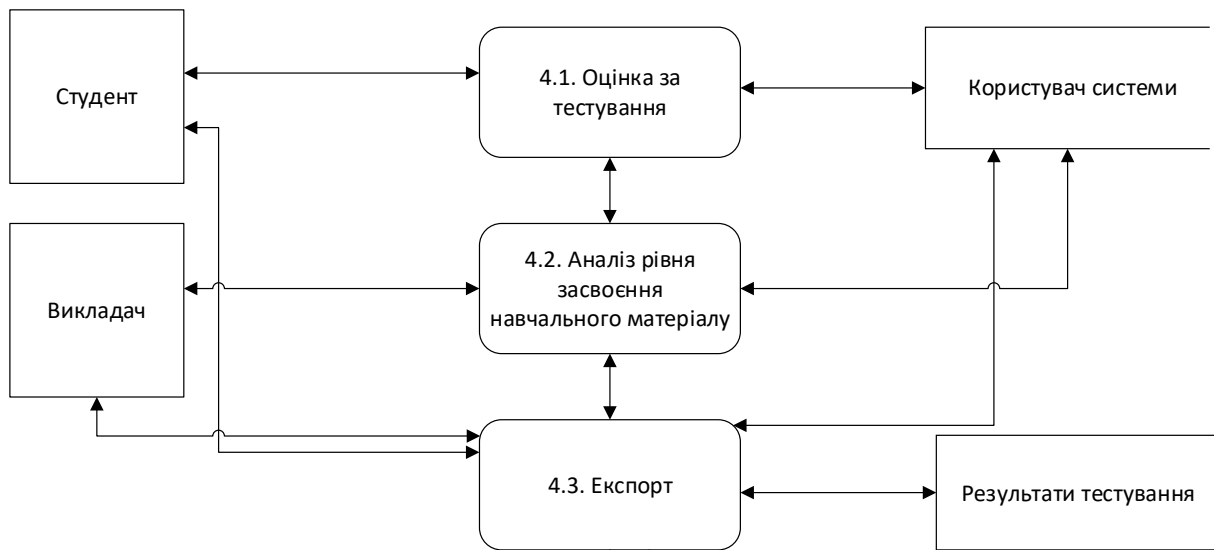


Рис. 8. Діаграма потоків даних Агента результатів тестування знань споживачів освітніх послуг в онлайн-системі вдосконалення навчального процесу у ЗВО

теми» 2019/2020 та 2020/2021 навчальні роки для студентів 1 курсу другого магістерського рівня спеціальності 124 «Системний аналіз». Для аналізу результатів тестування споживачів освітніх послуг за вказаною дисципліною введемо показник адекватності навчальної дисципліни, який є відношенням кількості позитивних та показника відвідуваності дисципліни споживачами освітніх послуг до загальної кількості оцінок, отриманих по цій дисципліні. Значення показника вважатимемо оптимальним, тобто навчальний курс є якіс-

ним, якщо воно належить проміжку  $(0,7;1]$ , прийнятним, якщо воно належить проміжку  $(0,5; 0,7]$  і незадовільним, якщо значення показника належатиме проміжку  $[0; 0,5]$ . Якщо значення показника є оптимальним, то навчальна дисципліна не потребує перегляду; якщо значення показника є прийнятним, то необхідно переглянути деякі аспекти навчальної дисципліни; якщо значення показника є незадовільним, то основною рекомендацією для цієї навчальної дисципліни є повний перегляд її структури та контенту, а також адап-

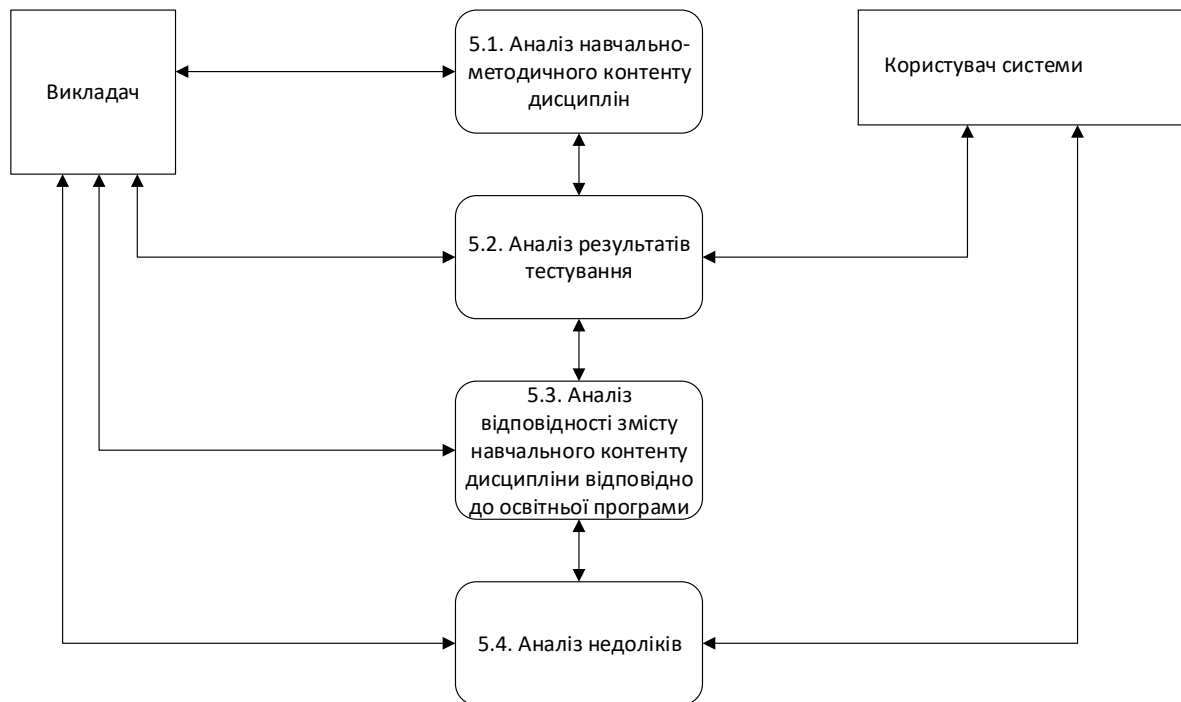


Рис. 9. Моніторинг якості навчального процесу та формування рекомендацій в онлайн системі удосконалення навчального процесу у ЗВО

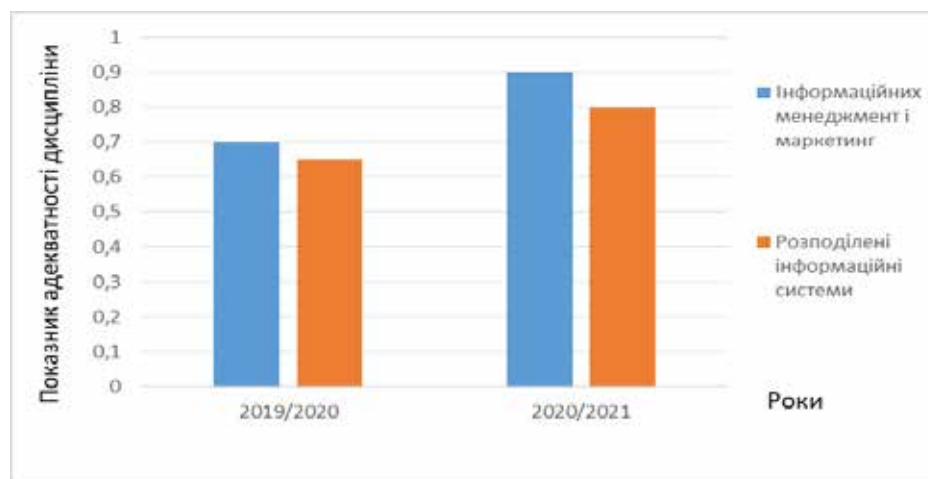


Рис. 10. Показники адекватності курсу для дисциплін «Інформаційний менеджмент і маркетинг» та «Розподілені інформаційні системи» на прикладі веб-ресурсу Віртуального навчального середовища Національного університету «Львівська політехніка»

тація цієї дисципліни до ринкових умов та потреб споживачів освітніх послуг.

Показники адекватності курсу для дисциплін «Інформаційний менеджмент і маркетинг» та «Розподілені інформаційні системи» на прикладі веб-ресурсу Віртуального навчального середовища Національного університету «Львівська Політехніка» показано на рис. 10.

Отже, як видно з Рис. 10, прийнятного значення показники адекватності для обох навчальних дисципліни набули у 2019/2020 навчальному

році. У 2020/2021 навчальному році цей показник набув оптимального рівня після перегляду деяких аспектів навчального курсу.

Отже, формування рекомендацій в онлайн-системі для вдосконалення навчального процесу, які гуртуються на результатах оцінювання споживачів освітніх послуг, показують ефективність наданих рекомендацій у рамках вивчення конкретних дисциплін.

**Висновки.** Отже, в даній роботі запропоновано архітектуру онлайн-системи для удосконалення

навчального процесу, яка гуртується на результатах оцінювання споживачів освітніх послуг для ефективного планування надання освітніх послуг, що дало можливість оптимізувати процес перевірки знань споживачів освітніх послуг та налагодити систему оцінювання знань не залежно від середовища навчання. У роботі побудовано архітектуру та функціональну структуру онлайн-системи для вдосконалення навчального процесу в закладах вищої освіти. Діаграма потоків даних комплексної інформаційної онлайн-системи для вдосконалення навчального процесу у закладах вищої освіти описує функціонування програмних агентів процедури реєстрації користувача в системі, вибору предмету для оцінювання, тестування та його результатів, що дозволить сформулювати предметні рекомендації для покращення

якості процесу засвоєння навчального матеріалу. Особливістю запропонованої онлайн-системи є її можливість функціонування як інтегрованого модуля до обраного навчального середовища, так і для автономного процесу оцінювання знань споживачів освітніх послуг не лише у ЗВО. Аналіз результатів формування рекомендацій в онлайн-системі для удосконалення навчального процесу, які гуртуються на показниках адекватності курсу для дисциплін «Інформаційний менеджмент і маркетинг» та «Розподілені інформаційні системи» на прикладі веб-ресурсу Віртуального навчального середовища Національного університету «Львівська Політехніка» підтверджує актуальність розробки запропонованої онлайн-системи для вдосконалення навчального процесу в закладах вищої освіти.

#### Список літератури:

1. Pucciarelli F., Kaplan A. Competition and strategy in higher education: Managing complexity and uncertainty. *Business Horizons*, 2016. 59. P. 311–320.
2. Mikhno, N., Sorokina, L. Trend analysis of the educational choice of university entrants as tool to improve the quality of educational service. *International Journal of Information and Communication Technologies in Education*, 2017. 6(3). P. 36–39.
3. Xuemina Zh., Zhiming S., Pinga G. The Process of Information Systems Architecture Development. In *Proceedings of the International Workshop on Information and Electronics Engineering (IWIEE) Procedia Engineering*, 2012. P. 775–779.
4. Abel R., Brown M., Sues J. A New Architecture for Learning. *Educause Review*, 2013. Vol. 48. P. 88–102.
5. Xiaohai L., Yafei T. Architecture Framework and its Design Method. *Fire Control & Command Control*, 2010. Vol.1. P. 6–8.
6. Prayitno T. Planning of Higher Education Information Technology Strategy Using TOGAF (A Case Study at AMN Cilacap). *Indonesian Journal of Information Systems*, 2019. Vol. 2(1). P. 67–79.
7. Luftman J. N., Lewis P.R., Oldach S.H. Transforming the enterprise: The alignment of business and information technology strategies. *IBM System Journal*, 2010. Vol. 32(1). P. 198–221.
8. Mardiana Araki K. EA-MDA Model to Resolve is Characteristic Problems in Educational Institutions. *International Journal of Software Engineering & Applications*, 2013. Vol. 4(3). P. 1–20.
9. Bidan M., Rowe F., Truex D. An empirical study of IS architectures in French SMEs: integration approaches. *European Journal of Information Systems*, 2012. Vol. 21. P. 287–302.
10. Natek S, Lesjak D. The process architecture of information systems – higher education institution's managerial tool. *Issues Information Systems*, 2010. Vol. 1. P. 29–34.
11. Natek S, Lesjak D. Integrated Higher Education Information systems – Professors' knowledge management tools. *Issues Information Systems*, 2011. Vol. 12. P. 80–86.
12. Zhezhnych P., Shilinh A., Demydov I. Architecture of the computer-linguistic system for processing of specialized web-communities' educational content. *Proceedings of the 2nd International workshop on control, optimisation and analytical processing of social networks (Lviv, Ukraine, May 21), 2020*. Vol. 2616. P. 1–11.
13. Sanchez-Puchola F., Pastor-Collado J. A., Borrell B. Towards an Unified Information Systems Reference Model for Higher Education Institutions. *Procedia of computer science*, 2017. Vol. 121. P. 542–553.
14. Charles Sturt University. Higher Education Process Reference Model. Charles Sturt University. *Work Process Improvement (2010)*. [Electronic resource]. Available at: <http://www.csu.edu.au/special/wpp/resources/reference-model>.
15. Коноваленко О.С., Брусенцев В.О. Використання автоматизованих систем управління в навчальному процесі. Системи обробки інформації. Харків : ХУПС, 2007. Вип. 1(59). С. 154–156.
16. Башмаков А.И. Разработка компьютерных учебников и обучающих систем. Москва : Информационно-издательский дом «Филинь», 2003. 616 с.
17. Коноваленко О.С., Брусенцев В.О. Концепція створення і використання інформаційного порталу тестування та оцінювання знань. *Системи обробки інформації*. 2010. № 9. С. 153–156.

**Shilinh A.Yu. ARCHITECTURE OF THE RECOMMENDATIONS ONLINE SYSTEM FOR IMPROVING THE EDUCATIONAL PROCESS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS**

*The aim of the work is the architecture of the recommendations online system for improving the educational process in higher education institutions. In the article was defined that the development of recommendations online system for improving the educational process, which can exist as an independent element or as part of a platform for distance learning, is relevant in the context of the Covid-19 pandemic. The proposed information system of recommendations is based on a comprehensive information system for assessing the knowledge of educational services consumers in higher education institutions. In the article was defined that the use of recommendations online system for improving the educational process makes it possible to optimize the process of testing the knowledge of educational services consumers and the decision-making process of higher education to improve the quality of teaching materials and learning process. The proposed online system is a reflection of the feedback between the participants in the educational process. The paper proposes the architecture and functional structure of the online system of recommendations for improving the educational process for higher education institutions. The data flow diagram of the complex information system for improving the educational process describes the functioning of software agents of procedures, namely the Agent of registration of the user in the system, the Agent of subject selection for evaluation, the Agent of testing and processing of its results. disciplines. The results of the study are used and can be used to form recommendations for improving the educational process in higher education institutions based on assessing the knowledge of consumers of educational services, effective adaptation of the educational process in higher education institutions, and regular testing of employees by educational institutions and organizations.*

**Key words:** *online system architecture, functional structure of the system, data flow diagram, software agent, learning process.*

## Відомості про авторів

**Арсенюк І.Р.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Вінницького національного технічного університету

**Баган Т.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бережна Н.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і логістики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Блезнюк О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації, надійності, міцності та будівництва імені В.Я. Аніловича Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Бойко С.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Криворізького національного університету

**Бунке О.С.** – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бунь В.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бутенко О.В.** – магістр, PhD-студент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету

**Вакалюк Т.А.** – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

**Василенко М.Д.** – доктор фізико-математичних наук, доктор юридичних наук, професор, в.о. завідувача кафедри кібербезпеки Національного університету «Одеська юридична академія»

**Васильєв М.В.** – студент 6 курсу, групи ТК-1514, кафедри комп'ютерних технологій автоматизації, Інституту енергетики та комп'ютерних систем управління «Одеського національного політехнічного університету»

**Воробйов М.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Газдюк К.П.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

**Гарист А.В.** – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Глухова Н.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

**Гостіщев В.О.** – студент Одеського національного політехнічного університету

**Градовий О.В.** – аспірант кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету

**Гуйда О.Г.** – кандидат наук державного управління, старший викладач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Гусарова О.В.** – викладач циклової комісії природничих дисциплін Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Д'яченко Л.І.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

**Дзюба А.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механізації виробничих процесів у АПК Луганського національного аграрного університету

**Дикий О.В.** – кандидат юридичних наук, доцент, декан факультету кібербезпеки та інформаційних технологій Національного університету «Одеська юридична академія»

**Дубко В.О.** – доктор фізико-математичних наук, професор Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського



**Ємець В.В.** – викладач циклової комісії аеронавігації Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Жуковський В.Р.** – бакалавр, студент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету

**Журід В.І.** – викладач циклової комісії аеронавігації Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Жученко О.А.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Зайцев Є.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізико-математичних дисциплін Льотної академії Національного авіаційного університету

**Залюбовський М.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

**Золотоверх Д.С.** – студент 4-го курсу факультету кібербезпеки та інформаційних технологій Національного університету «Одеська юридична академія»

**Глін А.В.** – магістр кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

**Киричек Г.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

**Колісніченко С.Ф.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри авіаційної техніки Льотної академії Національного авіаційного університету

**Коротинський А.П.** – доктор філософії, асистент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Коротун О.В.** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

**Куклій Д.В.** – студент 2-го курсу, кафедри обчислювальної техніки Факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Вінницького національного технічного університету

**Купін А.І.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету

**Кутковецька Т.О.** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва

**Кушнірчук О.М.** – здобувач Державного університету «Житомирська політехніка»

**Ліннік І.С.** – студент 6-го курсу кафедри Комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету

**Левкін А.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри кібернетики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Левкін Д.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Лук'янов І.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Луцко Л.І.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Майданюк В.П.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету

**Максимов М.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету

**Максимова О.Б.** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник науково-дослідного відділу математичного моделювання і розвитку навчальних технологій науково-дослідного управління проблем розвитку та застосування ВМС Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія»

**Малишев В.В.** – доктор технічних наук, професор, директор Інженерно-технологічного інституту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

**Маринич І.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету

**Марцева Л.А.** – доктор педагогічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка»

**Мельник О.Г.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри управління у сфері цивільного захисту Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

**Мельник Р.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри техніки та засобів цивільного захисту Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

**Мінчев Д.С.** – бакалавр, студент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету

**Міщенко І.Л.** – студент 6-го курсу кафедри Комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету

**Москалик В.М.** – викладач циклової комісії природничих дисциплін Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Мошенський А.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій

**Мушка А.О.** – магістрант кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій

**Новіков В.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки Національного університету «Одеська юридична академія»

**Новіков П.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Олалі Майкл Олала** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри машинобудування Найджа Дельта Університету, Нігерія

**Олалі Н.В.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математики Найджа Дельта Університету, Нігерія

**Олійник Ю.Л.** – викладач циклової комісії аеронавігації Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Осайсай Еванс Фібібісейє** – доктор філософії, завідувач кафедри математики Найджа Дельта Університету, Нігерія

**Панасюк І.В.** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту інженерії та інформаційних технологій Київського національного університету технологій та дизайну

**Пелюх П.О.** – студентка Одеського національного політехнічного університету

**Підпригора Ю.А.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Пісоцька Л.А.** – доктор медичних наук, доцент, професор кафедри госпітальної терапії ДЗ «Дніпропетровська медична академія Міністерства охорони здоров'я України»

**Прокоп Ю.В.** – кандидат історичних наук, старший викладач кафедри інформаційних технологій Одеської національної академії зв'язку імені О.С. Попова

**Рагулін С.В.** – кандидат технічних наук, завідувач кафедри авіаційної техніки Льотної академії Національного авіаційного університету

**Рачук В.О.** – асистент кафедри кібербезпеки Національного університету «Одеська юридична академія»

**Романюк О.Н.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету

**Рудьковський О.Р.** – аспірант Донецького національного технічного університету

**Савченко Ю.Г.** – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сердюк О.Ю.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автоматизації, комп’ютерних наук і технологій Криворізького національного університету

**Сидоренко О.І.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Снігур А.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки Вінницького національного технічного університету

**Тарахтій О.С.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комп’ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету

**Тарновецька О.Ю.** – кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

**Топчій Н.В.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Трофименко О.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Національного університету «Одеська юридична академія»

**Трубачев С.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Хібеба М.Г.** – асистент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Хіль В.В.** – студент магістратури Одеського національного політехнічного університету

**Чернишов К.А.** – аспірант кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету

**Чумаченко С.М.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій

**Шарабайко О.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри військової підготовки Льотної академії Національного авіаційного університету

**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 32 (71) № 2 2021**

**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 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 22,50. Ум. друк. арк. 32,43. Зам. № 0621/238

Підписано до друку 23.04.2021. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +38 (048) 709 38 69,

+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.