

**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 30 (69) № 2 2019**

**Частина 1**

**Київ  
2019**

## **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;

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

**Дубко Валерій Олексійович** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**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 автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Кузьменко Борис Володимирович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

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

**Чумаченко Сергій Миколайович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

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

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet  
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського  
(протокол № 9 від 28.05.2019 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 з технічних наук відповідно Наказу Міністерства освіти і науки України від 28.12.2017 № 1714 (додаток 7)

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, 2019

# ЗМІСТ

## МАШИНОЗНАВСТВО

<b>Поліщук М.М., Кузнецов Ю.М.</b> МОРФОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ І ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ ДОВІЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ.....	1
--	---

## ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

<b>Ковальчук Ю.О., Оляднічук Р.В., Ковальчук А.О.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ПОВЕРХНЕВІ ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ СТАЛІ 45.....	13
---	----

<b>Нечасів В.П., Рязанцев А.О.</b> ТЕХНОЛОГІЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОВОГО ЗМІЦНЕННЯ НАВАНТАЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ.....	18
---	----

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

<b>Борак К.В.</b> ЗМІНА ПОВЕРХНЕВОЇ ТВЕРДОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДИСКОВИХ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	24
---	----

## АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

<b>Єнчев С.В.</b> ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ НЕЧІТКОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИМИ ДВИГУНАМИ.....	29
---	----

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

<b>Мірчук І.А.</b> ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО МОДИФІКУВАННЯ ОБОЛОНКИ З БЕЗГАЛОГЕННОЇ КОМПОЗИЦІЇ, ЩО НЕ ПОШИРЮЄ ПОЛУМ'Я НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КАБЕЛІВ.....	35
---	----

<b>Скрипченко О.В.</b> ЗАРЯДНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА.....	43
--	----

<b>Терещенко Т.О., Федін І.С., Овсієнко М.Ю., Лайкова Л.Г.</b> АВТОНОМНІ ІНВЕРТОРИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ.....	49
---	----

<b>Шмельов Ю.М., Чорна В.О., Мельник О.Є., Харитонов О.С., Ляхова О.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ НА РЕСУРС ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА.....	55
---	----

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

<b>Інь Ченлян, Лазебний В.С.</b> ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ IEEE 802.11 НА ПІДҐРУНТІ КОНЦЕПЦІЇ ВІРТУАЛЬНОГО КОНКУРЕНТНОГО ВІКНА.....	61
---	----

<b>Семенов А.О., Політанський Р.Л., Гончарук А.В., Дурицький О.М., Чорний В.В.</b> АНАЛІЗ АВТОКОЛИВНИХ СИСТЕМ ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР.....	69
--	----

<b>Тищенко О.С., Гумен Т.Ф., Трапезон К.О.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ BLOKCHAIN В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ.....	77
--	----

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

**Бабаков Р.М.**

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИНТЕЗА МИКРОПРОГРАММНЫХ АВТОМАТОВ  
С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ .....82

**Батурін О.І., Лифар В.О., Іванов В.Г., Лифар О.К.**

СТРУКТУРНО-ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ  
ОСВІТНЬОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ТА ЯКОСТІ ВИЩОЇ ОСВІТИ В УНІВЕРСИТЕТІ.....87

**Вяткин С.И., Романюк А.Н., Романюк О.В., Лысенко Е.С.**

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫЕ ОПЕРАЦИИ НАД СВОБОДНЫМИ ФОРМАМИ.....93

**Злепко С.М., Пруднус П.Г., Барановський Д.М., Паламарчук М.І.**

АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ  
ГЛІКЕМІЧНИМ ПРОФІЛЕМ ХВОРОГО НА ЦУКРОВИЙ ДІАБЕТ.....97

**Коваль Л.Г., Злепко С.М., Новіцький Г.М., Кречотень Є.Г.**

МЕТОДИ І ТЕХНОЛОГІЇ БІОМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ  
ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....104

**Козоровська К.А., Газгірєєв Р.А., Бєглов К.В.**

ДОСЛІДЖЕННЯ АСР КОНЦЕНТРАЦІЇ БОРНОЇ КИСЛОТИ (БК) У ПЕРШОМУ КОНТУРІ АЕС  
ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА.....113

**Коломоєць Г.П., Кісельов Є.М., Таранець А.В.**

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ОБЛІКУ НАВЧАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ  
З УРАХУВАННЯМ МАЛОЧИСЕЛЬНИХ ГРУП.....118

**Коцун В.І.**

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ СВІТЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВЕРТИКАЛЬНОГО КУТА РОЗХОДЖЕННЯ  
ДЖЕРЕЛА СВІТЛА У ПЛАНАРНІЙ СТРУКТУРІ.....129

**Кравець Р.Б., Серов Ю.О., Федушко С.С., Ізонін І.В.**

КОНСОЛДОВАНИЙ ІНФОРМАЦІЙНИЙ РЕСУРС  
ПІДПРИЄМСТВ МЕДИЧНОЇ ГАЛУЗІ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ.....135

**Лобачев М.В., Мещеряков Д.В.**

НЕЧЕТКИЙ КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ  
С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ.....142

**Митрофанов О.В.**

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ГАЗОТЕПЛОНОСІЙНИМИ ПОТОКАМИ  
НА КОНВЕЄРНІЙ ВИПАЛЮВАЛЬНІЙ МАШИНІ.....149

**Недашківський Є.А.**

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТИМЧАСОВИХ РЯДІВ  
З ФРАКТАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ НА ОСНОВІ ЛІНГВІСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....155

**Осадчий В.В., Осадча К.П., Конохов С.Л., Сердюк І.М., Муждабаєв А.М.**

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ  
ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ДОРОЖНЬОГО ПОЛОТНА  
ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАСОБІВ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ.....161

**Павлов В.Г.**

ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЯ ДІНАМІЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ  
ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ПОТОЧНИХ ОБЧИСЛЕНЬ.....166

**Повхан І.Ф.**

ПОНЯТТЯ ФУНКЦІЇ ТА АЛГЕБРАЇЧНОЇ СХЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ  
В ЗАДАЧАХ КЛАСИФІКАЦІЇ ДИСКРЕТНИХ ОБ'ЄКТІВ.....171

<b>Погромська Г.С.</b> ЗАСТОСУВАННЯ ВАЛІДАТОРІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ SQL-ІН'ЄКЦІЙ ДО БАЗ ДАНИХ.....	177
<b>Савенко О.С.</b> ВИЯВЛЕННЯ БОТ-МЕРЕЖ РОЗПОДІЛЕНИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВІ КЛАСИФІКАЦІЇ.....	183
<b>Савчук Т.О., Паламарчук В.Л.</b> АНАЛІЗ ВПЛИВУ ОБФУСКАЦІЇ ПРОГРАМНОГО КОДУ НА ВИЯВЛЕННЯ ШКІДЛИВОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	192
<b>Слободяник А.Д., Коваль Л.Г., Гомолінський В.О., Криворучко І.О., Клапоушак А.Ю.</b> ОСНОВИ ІНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ АПРОКСИМАЦІЇ ДАНИХ В ОПТОЕЛЕКТРОНІЦІ.....	196
<b>Тарасенко Я.В., Карапетян А.Р., Сіпко О.М.</b> СОЦІОЛІНГВІСТИЧНИЙ АСПЕКТ ФОРМУВАННЯ ТЕКСТІВ У ПРОЕКТУВАННІ ЕРГОДИЗАЙНУ САЙТУ.....	204
<b>Терейковська Л.О., Терейковський О.І.</b> НЕЙРОМЕРЕЖЕВА МОДЕЛЬ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙ ПО ЗОБРАЖЕННЮ ОБЛИЧЧЯ.....	209
<b>Тимофєєва А.Є., Кудін О.В., Кривохата А.Г., Лісняк А.О.</b> АВТОМАТИЧНЕ АНОТУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	214
<b>Трифорова А.І., Доценко Н.В.</b> РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВЗАЄМОДІЇ СТЕЙКХОЛДЕРІВ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ.....	220
<b>Тытюк П.В., Шевченко И.В.</b> МОДЕЛИ КЛАССИФИКАЦИИ СИТУАЦИЙ И ПРОБЛЕМНЫХ ЗОН НА МЕЖДУНАРОДНЫХ АВТОПЕРЕВОЗКАХ.....	226
<b>Чекурін В.Ф., Пономарьов Ю.В., Химко О.М.</b> МЕТОД КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ ЗА ДАНИМИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ.....	234

# CONTENTS

## MACHINE SCIENCE

**Polishchuk M.N., Kuznetsov Yu.N.**

MORPHOLOGICAL ANALYSIS AND PARAMETRIC SYNTHESIS  
OF MOBILE ROBOTS OF ARBITRARY ORIENTATION .....1

## ATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

**Kovalchuk Y.O., Olyadnichuk R.V., Kovalchuk A.O.**

RESEARCH OF LASER STRENGTHENING EFFECT  
ON SURFACE RESIDUAL STRESSES OF STEEL 45.....13

**Nechaev V.P., Ryazantsev A.A.**

TECHNOLOGY OF PLASMA CASE-HARDENING OF LOADED SUPPORT SURFACE DETAILS ...18

## INDUSTRIAL ENGINEERING

**Borak K.V.**

CHANGE IN SURFACE HARDNESS OF DISC WORKING BODIES  
OF TILLAGE MACHINES IN THE OPERATION PROCESS .....24

## AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

**Yanchev S.V.**

ENSURING THE FAULT-TOLERANCE OF FUZZY  
INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM OF AVIATION ENGINES.....29

## ELECTRICAL ENGINEERING

**Mirchuk I.A.**

INFLUENCE OF IRRADIATION OF THE SHEATH OF HALOGEN FREE FLAME  
RETARDANT COMPOUND ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF CABLES .....35

**Skrypchenko O.V.**

CHARGER FOR SUPERCAPACITOR.....43

**Tereshchenko T.O., Fedin I.S., Ovsienko M.Yu., Laikova L.G.**

AUTONOMOUS INVERTERS IN POWER SUPPLY SYSTEMS  
WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES.....49

**Shmelov Yu.M., Chorna V.O., Melnik O.Ye., Kharitonov O.S., Lyahova O.V.**

RESEARCH INFLUENCE OF OPERATING MODES  
ON THE RESOURCE OF THE ELECTRIC DRIVE ENGINE .....55

## RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

**Ch. Yin, Lazeбnyi V.S.**

DETERMINATION OF THE WIRELESS NETWORK CHARACTERISTICS OF IEEE 802.11  
STANDARD ON THE BASICS OF THE VIRTUAL CONTENTION WINDOW CONCEPT .....61

**Semenov A.O., Politanskyi R.L., Goncharuk A.V., Durytskyi O.M., Chorny V.V.**

ANALYSIS OF THIRD-ORDER SELF-OSCILLATORY SYSTEMS OF MICROELECTRONIC  
DETERMINISTIC CHAOS OSCILLATORS BASED ON BIPOLAR TRANSISTOR STRUCTURES ...69

**Tyshchenko O.S., Gumen T.F., Trapezon K.O.**

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS  
OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN DATA TRANSMISSION INFORMATION SYSTEMS.....71

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

**Babakov R.M.**

METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE SYNTHESIS OF THE MICROPROGRAMMABLE  
FINITE-STATE MACHINES WITH DATAPATH OF TRANSITIONS .....82

**Baturin O.I., Lyfar V.O., Ivanov V.H., Lyfar O.K.**

STRUCTURAL-INFORMATIONAL MODEL OF PROCESSES  
FOR ENSURING THE QUALITY OF EDUCATIONAL ACTIVITY  
AND THE QUALITY OF HIGHER EDUCATION AT THE UNIVERSITY .....87

**Vyatkin S.I., Romaniuk A.N. Romanyik O.V., Lysenko E.S.**

THEORETICAL AND MULTIPLE OPERATIONS OVER FREE FORMS..... 93

**Zlepko S.M., Prudyus P.H., Baranovskyi D.M., Palamarchuk M.I.**

APPARATUS-SOFTWARE COMPLEX FOR MONITORING  
AND CONTROL OF GLUCIQUE PROFILE OF DIABETES MELLITUS.....97

**Koval L.H., Zlepko S.M., Novitskyi H.M., Krekoten Ye.H.**

METHODS AND TECHNOLOGIES OF BIOMETRIC IDENTIFICATION  
BY RESULTS OF LITERARY SOURCES.....104

**Kozorovskaya K.A., Gazgireev R.A., Beglov K.V.**

STUDY OF ASR CONCENTRATION OF BORIC ACID (BC)  
IN THE FIRST CIRCUIT OF THE NPP USING A SELF-ADJUSTING REGULATOR.....113

**Kolomoets G.P., Kiselev E.M., Taranets A.V.**

INFORMATION SYSTEM FOR STUDYTIME ACCOUNTING ACCORDING  
TO LITTLE GROUPS .....118

**Kotsun V.I.**

MODELING OF THE PROCESS FOR LIGHT RADIATION MIXING  
DEPENDING FROM VERTICAL ANGLE OF LIGHT SOURCE  
DISSOLUTION IN PLANARIAN STRUCTURE .....129

**Kravets R.B., Syerov Yu.O., Fedushko S.S., Izonin I.V.**

CONSIDERED INFORMATIONAL RESOURCE  
ENTERPRISES OF MEDICAL INDUSTRY OF WESTERN UKRAINE.....135

**Lobachev M.V., Meshcheriakov D.V.**

FUZZY CLUSTER ANALYSIS IN THE CONTROL SYSTEM WITH BIOLOGICAL FEEDBACK.....142

**Mytrofanov O.V.**

AUTOMATED CONTROL OF GAS AIR FLOWS ON A CONVEYOR BURNING MACHINE .....149

**Nedashkivskyi Ye.A.**

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF FORECASTING  
TIME SERIES WITH FRACTAL PROPERTIES BASED ON LINGUISTIC MODELING .....155

**Osadchy V.V., Osadcha K.P., Konyukhov S.L. Serdyuk I.M., Mugdabaev A.M.**

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE FOR DETERMINING  
THE DAMAGE TO THE ROAD CIRCULATION BY COMPUTER VIEWS.....161

**Pavlov V.G.**

DISPATCHING OF DYNAMIC LOAD BALANCING OF COMPUTING DEVICES BASED  
ON EVALUATING STATE OF CURRENT CALCULATIONS .....166

**Povkhan I.F.**

THE CONCEPT OF FUNCTION AND ALGEBRAIC RECOGNITION SCHEME  
IN CLASSIFICATION PROBLEMS OF DISCRETE OBJECTS .....171

---

<b>Pohromska H.S.</b> APPLICATION OF VALIDATORS FOR THE IMPLEMENTATION OF THE MODEL OF RESEARCH OF SQL INJECTIONS IN DATABASES .....	177
<b>Savenko O.S.</b> DISTRIBUTED SYSTEM OF DETECTION OF BOTNET BASED ON CLASSIFICATION .....	183
<b>Savchuk T.O., Palamarchuk V.L.</b> IMPACT ANALYSIS OF SOFTWARE CODE OBFUSCATION ON MALWARE DETECTION .....	192
<b>Slobohianyk A.D., Koval L.H., Homolinskyi V.O., Kryvoruchko I.O., Klapoushchak A.Yu.</b> BASIS OF INTERVAL ANALYSIS FOR DATA APROXIMATION IN OPTOELECTRONICS .....	196
<b>Tarasenko Ya.V., Karapetyan A.R., Sipko O.M.</b> SOCIOLOGICAL ASPECT OF TEXTS' FORMATION IN THE SITE'S ERGO DESIGNING .....	204
<b>Tereikovska L.O., Tereikovskiy O.I.</b> NEURAL NETWORK MODEL OF EMOTIONAL RECOGNITION BY IMAGE OF FACE.....	209
<b>Timofeeva A.E., Kudin O.V., Kryvokhata A.G., Lisnyak A.O.</b> AUTOMATIC IMAGE ANNOTATION USING NEURAL NETWORKS .....	214
<b>Tryfonova A.I., Dotsenko N.V.</b> DEVELOPMENT OF THE MODEL FOR INTERACTION ANALYSIS OF INNOVATION PROJECT STAKEHOLDERS .....	220
<b>Tytyuk P.V., Shevchenko I.V.</b> MODELS OF CLASSIFICATION OF SITUATIONS AND PROBLEM ZONES IN INTERNATIONAL TRANSPORTATION.....	226
<b>Chekurin V.F., Ponomaryov Yu.V., Khymko O.M.</b> A METHOD FOR INTEGRITY INSPECTION OF LINEAR PART OF MAIN GAS PIPELINE WITH THE USE OF DATA OF THE FLOW PARAMETERS MONITORING.....	234



# МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.865.8(031)

**Поліщук М.М.**

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

**Кузнєцов Ю.М.**

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

## МОРФОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ І ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ ДОВІЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ

*У статті вперше здійснено морфологічний аналіз структур, надано модифіковану методику параметричної оптимізації мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі. Відмінність запропонованих моделей полягає у відображенні взаємозв'язку цільових функцій оптимізації параметрів мобільних роботів на різних рівнях ієрархії їх структур. Запропоновано критерії оптимізації конструктивних та технологічних параметрів на прикладі мобільного робота для обслуговування деревних лісних і паркових масивів.*

**Ключові слова:** мобільні роботи, роботи вертикального переміщення, альпіністські роботи, морфологічний аналіз, параметричний синтез.

**Постановка проблеми.** Ключове завдання проектування нового засобу виробництва, яким є мобільні роботи довільної орієнтації (РДО) в технологічному просторі, що відомі в міжнародних виданнях під терміном “Climber Robot” («альпіністський робот»), полягає у створенні відсутніх поки що інженерних методик конструювання їх пристроїв у взаємозв'язку з умовами експлуатації в різноманітних перспективних галузях застосування РДО.

Більшість сучасних досліджень у цій галузі спрямована на створення оригінальних дослідних зразків мобільних роботів, але без системного підходу до їх структурного та параметричного синтезу. Відсутність системного, науково обгрунтованого підходу до проектування мобільних роботів довільної орієнтації шкодить їх цільовому, тобто спрямованому на виконання технологічних функцій, синтезу виконавчих підсистем для застосування в різних галузях промисловості та господарств.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відомій роботі [1, с. 33–42] надано огляд сучасних дослідних зразків так званих альпіністських роботів з відображенням різноманітних конструкцій зчеплення з поверхнею переміщення, але, на жаль, без будь-яких методичних рекомендацій щодо їх проектування. Ця недостатність частково

компенсована в роботі [2, с. 67–78], в якій запропоновано напрями вдосконалення мобільних РДО, та в монографії [3, с. 37–46], присвяченій проектуванню мобільного робота цільового призначення, а саме для діагностики дерев лісових та паркових масивів. На відміну від останньої, в монографії [4] запропоновано методики проектування мобільних роботів та стратегії управління ними. Однак слід констатувати, що в жодній роботі не застосовується такий системний метод дослідження, як морфологічний аналіз, та відповідний йому параметричний синтез функціональних підсистем мобільних роботів.

**Постановка завдання.** Для відтворення системного підходу до проектування мобільних РДО необхідно на основі методів морфологічного аналізу та структурно-параметричного синтезу [5, с. 3–8; 6; 7], що досить добре зарекомендували себе в інших галузях технічних наук, побудувати морфологічну модель та здійснити параметричний синтез виконавчих органів мобільних РДО у зв'язку з умовами їх експлуатації. Метою й нагальною потребою побудови зазначеної моделі є синтез придатних для експлуатації в промислових умовах проектно-конструкторських розв'язань мобільних технологічних роботів довільної орієнтації.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

*Морфологічний аналіз мобільних РДО на рівні інтеграції.* На відміну від викладеного вище, запропонуємо тут і розв'ямо надалі новий напрям синтезу мобільних роботів довільної орієнтації спочатку на основі такої аксіоми<sup>1</sup>: зменшення енергетичних витрат підсистем мобільних роботів приводить до зниження їх гравітаційного навантаження в сукупності динамічних навантажень, як транспортних, так і технологічних. Зрештою, реалізація цього підходу приводить до забезпечення надійності їх експлуатації. Зазначений напрям синтезу РДО у світовій теорії та практиці експериментальної побудови мобільних роботів досі не був досліджений.

Створення морфологічної моделі РДО є претечкою реалізації декларованих нижче принципів синтезу мобільних роботів як класу робото-технічних систем. Задля вирішення поставленого завдання застосуємо модифікацію методу морфологічного аналізу згідно з рекомендаціями С.В. Акімова [8, с. 2–9], що полягають у такому: спочатку в результаті морфологічного аналізу визначають простір пошуку, названий морфологічною множиною, яка обов'язково повинна містити шуканий розв'язок (структуру об'єкта), а потім звужують цей простір, здійснюючи пошук того рішення, яке є елементом морфологічної множини. Така процедура передбачає побудову морфологічного І/АБО-дерева об'єкта аналізу, який описує всю морфологічну множини, що підлягає розгляду. Однак оскільки в цьому разі необхідно представити конкретні об'єкти множини РДО у вигляді їх елементів, то, згідно з вищевказаними рекомендаціями, визначимо ребра (гілки), відповідні значенням класифікаційних ознак мобільних РДО. Тоді після вибору значень класифікаційних ознак з АБО-вершин буде виходити лише по одному ребру (однієї гілки) для кожного вибраного значення ознак системи, а сама вершина виявиться виродженою. Виконавши таку операцію для всіх необхідних АБО-вершин, одержимо морфологічне І-дерево з виродженими АБО-вершинами, яке однозначно ідентифікує наш об'єкт дослідження, а саме РДО, як технічну систему, що підлягає аналізуванню. Щодо І-вершин позначимо, що вони, як і в разі І/АБО-дерева, будуть персоніфікувати агрегацію об'єктів, тому інформацію про морфологічну множини компонентів РДО доцільно

представити не у вигляді дерева, а у вигляді морфологічного графа (рис. 1).

Далі на основі отриманого графа розробимо багаторівневі морфологічні таблиці, що відповідають класам галузей застосування мобільних РДО, їхнім виробничим функціям, а також таким компонентам, як приводи, трансмісія та системи зчеплення роботів довільної орієнтації з поверхнею їх переміщення. Морфологічна таблиця, що включає характеристики галузей застосування роботів та властивості виконуваних ними виробничих операцій, представлена у вигляді табл. 1.

Тут і надалі значення ознаки «0» ілюструють апріорі не прийнятні комбінації відзначених морфологічних ознак інакше їх відображення в морфологічній таблиці приведе тільки до викривлення інформаційного масиву можливих технічних розв'язань. У матричному вираженні фіксуємо параметри, що наведені в табл. 1, у вигляді такої матриці:

$$\begin{matrix}
 A1 & A2 & A3 & A4 \\
 0 & B2 & B3 & B4 \\
 C1 & C2 & C3 & C4 \\
 D1 & D2 & D3 & D4 \\
 0 & E2 & E3 & E4 \\
 F1 & F2 & F3 & F4
 \end{matrix} \quad (1)$$

Отримана матрична структурна модель визначається за формулою:

$$S_1 = A4 \cdot B3 \cdot C4 \cdot D4 \cdot E3 \cdot F4 \quad (2)$$

Виходячи з формули (2), можемо сказати, що загальна кількість комбінацій можливих розв'язань складе таку величину:

$$N_1 = \prod_{i=1}^n K_i = 4 \times 3 \times 4 \times 4 \times 3 \times 4 = 3^2 \times 4^4 = 265 \text{ (варіантів)}. \quad (3)$$

Визначена кількість варіантів є поки що гіпотетично припустимою та підлягає експертизі доцільності реалізації комбінацій ознак, відображених у табл. 1. Відомо, що істотний недолік морфологічних таблиць полягає в тому, що, крім можливих структурних розв'язань, у них можуть бути присутні дублюючі комбінації або принаймні некоректні. Згідно з теорією морфологічного аналізу, що належить до евристичних методів, який споконвічно заснований на так званому морфологічному ящику швейцарського астронома Фріца Цвіккі (F. Zwicky), виключення непродуктивних комбінацій досягається їхньою експертною оцінкою, яку застосуємо тільки для загальнотехнічних ознак на першому та другому рівнях аналізу, а для відбору варіантів конструкцій роботів на третьому та четвертому рівнях аналізу застосуємо більш жорсткий критерій, заснований на порівнянні

<sup>1</sup> Аксіома (від др.-гр. “ἀξίωμα”, тобто «твердження, положення»), або постулат, – вихідне положення якоїсь теорії, прийняте в рамках цієї теорії істинним без вимоги доказу й використовуване під час доказу інших її положень.

конструкцій з базами даних аналогів та прототипів технічних розв'язань міжнародних патентів, що набагато достовірніше, ніж експертні оцінки.

На першому рівні аналізу класу «Галузі застосування – Виробничі функції», на відміну від подальших рівнів (3-го та 4-го), що містять вже конструктивні ознаки, досить виключити дублюючі комбінації ознак. Так, аналіз комбінацій табл. 1 дає змогу стверджувати, що транспортні функції А1, відеоспостереження А2 та операції діагностики А3 щодо таких об'єктів обслуговування, як висотні будинки, зайві, оскільки будь-яке висо-

тне спорудження оснащене підйомно-транспортною технікою (ліфти, вантажні підйомники). Аналогічно можна виключити комбінації С1 і С2 (транспортні та відеоспостереження) щодо мостів та віадуків, що традиційно обслуговуються крановим устаткуванням, а також D1 (транспортні) для промислових трубопроводів, які самі по собі виконують транспортні функції. Крім того, діагностика Е3 деревних масивів дублює їх відеоспостереження Е2, за допомогою якого здійснюють аналізування стану лісових та паркових насаджень, використовуючи літальні апарати.

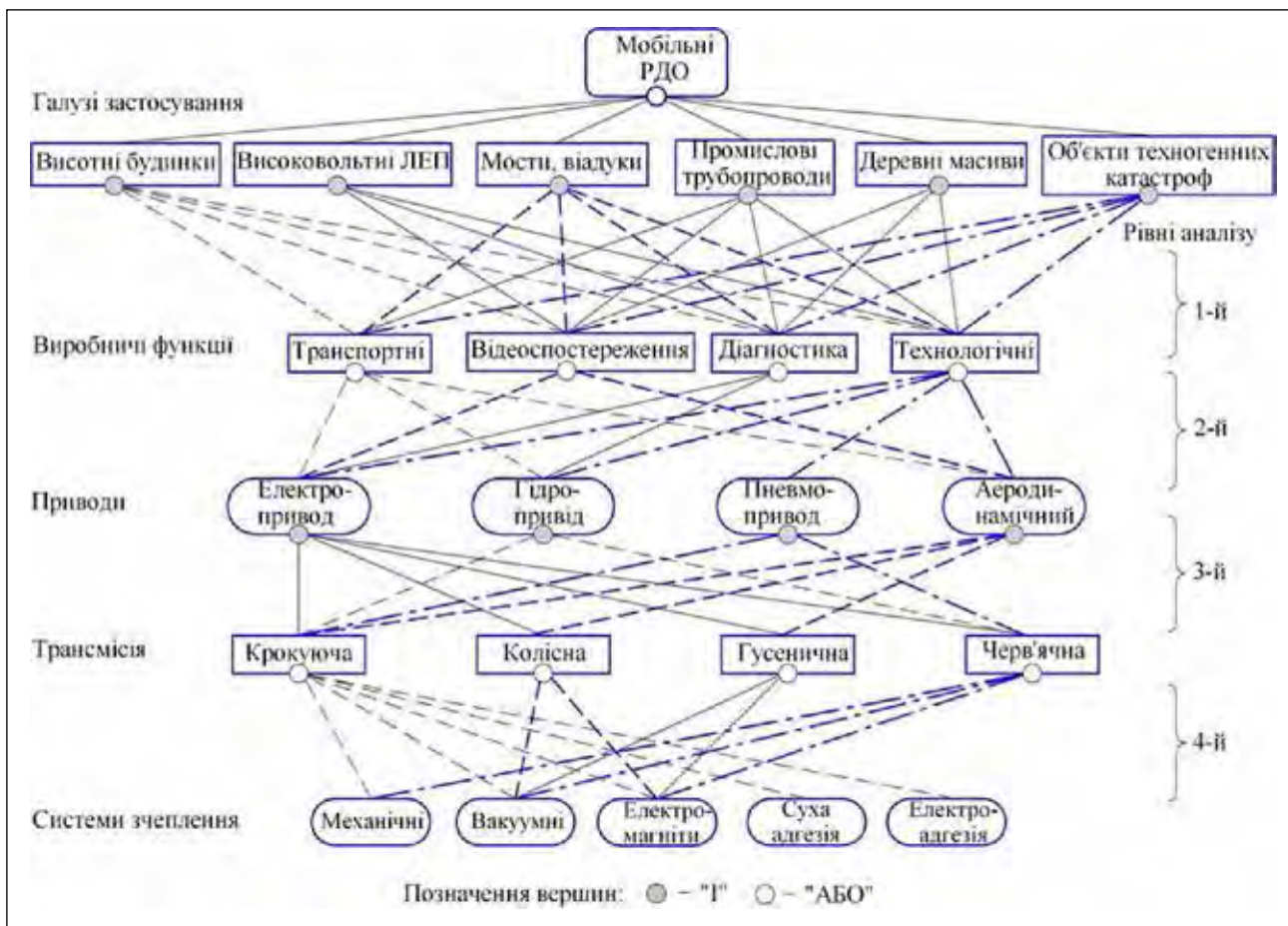


Рис. 1. Морфологічний граф мобільних РДО

Таблиця 1

Морфологічна таблиця 1-го рівня класу «Галузі застосування – Виробничі функції»

Галузі застосування	Виробничі функції			
	1	2	3	4
<b>A</b> Висотні будинки	Транспортні	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні
<b>B</b> Високовольтні ЛЕП	0	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні
<b>C</b> Мости, віадукі	Транспортні	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні
<b>D</b> Промислові трубопроводи	Транспортні	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні
<b>E</b> Деревні масиви	0	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні
<b>F</b> Об'єкти техногенних катастроф	Транспортні	Відеоспостереження	Діагностика	Технологічні

Тоді матриця (1) з урахуванням виключених морфологічних ознак прийме змінений вигляд:

$$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & A4 \\ 0 & B2 & B3 & B4 \\ 0 & 0 & C3 & C4 \\ 0 & D2 & D3 & D4 \\ 0 & E2 & 0 & E4 \\ F1 & F2 & F3 & F4, \end{matrix} \quad (2)$$

а нова матрична модель визначиться формулою:

$$S = A1 \cdot B3 \cdot C2 \cdot D3 \cdot E2 \cdot F4. \quad (5)$$

Отже, з формули (5) загальна кількість практично доцільних комбінацій застосування мобільних РДО складе таку величину:

$$N_{01} = \prod_{i=1}^n K_i = 1 \times 3 \times 2 \times 3 \times 2 \times 4 = 3^2 \times 2^4 = 25 \text{ (варіантів)} \quad (6),$$

чого цілком достатньо для їх промислово ефективної експлуатації.

На другому рівні морфологічного аналізу класу «Виробничі функції – Приводи» зіставимо можливі комбінації приводів мобільних РДО щодо виконуваних ними виробничих функцій (табл. 2).

Отже, матриця значень показників, наведених у табл. 2, має вигляд:

$$\begin{matrix} G1 & G2 & 0 & G4 \\ H1 & 0 & 0 & H4 \\ J1 & J2 & 0 & 0 \\ K1 & K2 & K3 & K4 \end{matrix} \quad (7)$$

Матрична структурна цієї моделі визначається формулою:

$$S_2 = G3 \cdot H2 \cdot J2 \cdot K4. \quad (8)$$

Виходячи з формули (8), бачимо, що загальна кількість комбінацій гіпотетично припустимих розв'язань складе таку величину:

$$N_2 = \prod_{i=1}^n K_i = 3 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4 = 3 \cdot 2^4 = 48 \text{ (варіантів)}. \quad (9)$$

Як і на попередньому рівні аналізу, отримана кількість варіантів є тільки гіпотетично можливою, тобто поки що без доказу інженерної доцільності. Однак слід взяти до уваги те, що для виконання транспортних функцій гідравлічний привід G2 хоча й має більшу питому потужність, проте суттєво поступається електроприводу за швидкістю, а також немає необхідності в настільки ефек-

тивній якості, як висока питома потужність, під час виконання ненавантажених операцій діагностики J2 (наприклад, ультразвуковими або оптичними методами), тому виключення зазначених ознак з інженерної точки зору слід визнати правомірним. Тоді з урахуванням цих оцінок доцільності застосування того чи іншого типу приводів матриця значень параметрів матиме такий вигляд:

$$\begin{matrix} G1 & 0 & 0 & G4 \\ H1 & 0 & 0 & H4 \\ J1 & 0 & 0 & 0 \\ K1 & K2 & K3 & K4 \end{matrix} \quad (10)$$

Змінена матрична структурна модель (10) визначається формулою:

$$S_2 = G2 \cdot H2 \cdot J1 \cdot K4, \quad (11)$$

виходячи з якої, можемо визначити, що загальна кількість комбінацій доцільних варіантів розв'язань складе практичну величину:

$$N_{02} = \prod_{i=1}^n K_i = 2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 4 = 2^2 \cdot 4 = 16 \text{ (варіантів)}. \quad (12)$$

Істотне обмеження морфологічних ознак на першому та другому рівнях аналізу дає змогу запобігти ускладненим конструкторським рішенням (нехай навіть гіпотетично припустимих) на подальших рівнях морфологічного аналізу технічної системи у вигляді мобільних РДО. Подальші рівні аналізу є найбільш відповідальними, оскільки вони визначають проектно-конструкторські розв'язання, від яких безпосередньо залежать виробничо-економічні показники експлуатації мобільних РДО.

Отже, на 3-му рівні аналізу класу «Приводи – Трансмисії» зіставимо можливі комбінації типів приводів РДО щодо видів трансмісії мобільних роботів (табл. 3) відповідно до графу на рис. 1.

Аналогічна матриця значень показників, наведених у табл. 3:

$$\begin{matrix} L1 & L2 & L3 & L4 \\ M1 & 0 & 0 & M4 \\ N1 & 0 & 0 & N4 \\ P1 & P2 & P3 & 0 \end{matrix} \quad (13)$$

Ця матрична структурна модель визначиться такою формулою:

$$S_3 = L4 \cdot M2 \cdot N2 \cdot P3. \quad (14)$$

Таблиця 2

Морфологічна таблиця другого рівня аналізу класу «Виробничі функції – Приводи»

Виробничі функції		Тип приводу			
		1	2	3	4
<b>G</b>	Транспортні	Електропривод	Гідропривід	0	Аеродинамічний
<b>H</b>	Відеоспостереження	Електропривод	0	0	Аеродинамічний
<b>J</b>	Діагностика	Електропривод	Гідропривід	0	0
<b>K</b>	Технологічні	Електропривод	Гідропривід	Пневмопривод	Аеродинамічний

Отже, виходячи з формули (14), можемо визначити, що загальна кількість комбінацій варіантів гіпотетично можливих розв'язань складе таку величину:

$$N_3 = \prod_{i=1}^n K_i = 4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 2^4 \cdot 3 = 48 \text{ (варіантів)}. \quad (15)$$

Однак на цьому рівні аналізу з огляду на надзвичайно високу відповідальність виключення морфологічних ознак, обумовлену впливом конструкторських розв'язань на економічні показники експлуатації мобільних РДО, недостатньо обмежитися тільки експертними оцінками, заснованими на попередньому досвіді проектування та інженерної логіки, адже необхідно застосувати більш жорсткі критерії відсівання гіпотетично можливих варіантів. Як такі критерії застосуємо, по-перше, принципи синтезу [9] мобільних роботів довільної орієнтації, а по-друге, наявні бази даних технічних рішень зі світовою новизною, а саме бази патентів США, Німеччини, Росії та України загального доступу. Аналоги й прототипи технічних розв'язань, що відображені в патентах зазначених країн, будемо використовувати як доказ інженерної правомірності варіантів морфологічних ознак. Однак спочатку як критерії відбору варіантів використаємо зазначені вище принципи синтезу мобільних РДО за такого тлумачення їх змісту.

*Принцип 1.* Нагромадження потенційної енергії на кожному попередньому кроці та перетворення її на кінетичну енергію руху на подальшому кроці руху. Вочевидь, найбільш ефективною в цьому разі буде крокуюча трансмісія, оскільки колісна та гусенична трансмісії є безперервними й вимагають більших шляхових дистанцій для нагромадження енергії, що знижує ефективність цього принципу. Оскільки типи приводів та трансмісії взаємозалежні з видом виробничих операцій, як це видно з морфологічного графа рис. 1, варіанти комбінацій ознак, що не задовольняють цьому принципу, повинні бути виключені.

*Принцип 2.* Інтеграція приводів поздовжнього та вертикального переміщення, а також приводів зміни орієнтації робота. Цей принцип має на меті

зменшення кількості приводів для зниження ваги робота, точніше, гравітаційного навантаження, що має принципове значення для мобільних роботів саме довільної орієнтації. Однак при цьому не допускається зменшення необхідного числа ступенів свободи роботів, що обслуговують об'єкти у відповідній їм системі координат, а саме прямокутній Декартовій, циліндричній або сферичній, а ще краще ангулярній, тобто кутовій системі без поступальних кінематичних пар механізмів, що притаманна антропоморфним конструкціям. Використання цього принципу як критерія відбору варіантів дає змогу виключити ті з них, які вимагають додаткових перетворюючих механізмів, через що не можуть забезпечити мінімізацію ваги робота.

*Принцип 3.* Застосування генераторів тяги (аеродинамічної піднімальної сили). Цей принцип декларує протидію гравітаційному навантаженню задля збільшення технологічного силового впливу за одночасного зменшення потужності приводів руху та зчеплення робота з поверхнею переміщення. Отже, із застосуванням цього принципу як критерія відбору варіантів та з урахуванням структурних зв'язків морфологічного графа рис. 1 на третьому рівні аналізу доцільно виключити ті варіанти комбінацій ознак, які не дають змогу досягати зменшення гравітаційного навантаження за допомогою застосування генераторів аеродинамічної піднімальної сили. Точніше, якщо реалізація прототипу варіанта вимагає підвищення сумарної потужності приводів, то цей варіант повинен бути виключений.

Послідовно виконуючи проекцію викладених принципів на морфологічні ознаки табл. 3 як критерії їх відсівання, доходимо таких висновків. Електропривод, хоча й поступається гідроприводу за потужністю, а пневматичному приводу – за швидкістю, маючи компактні автономні (для забезпечення мобільності робота) джерела живлення, є універсальним для всіх видів трансмісії. Ці якості дають змогу електроприводу задовольняти вимоги 2-го із зазначених вище принципів, а саме прин-

Таблиця 3

Морфологічна таблиця третього рівня аналізу класу «Приводи – Трансмісії»

Приводи		Вид трансмісії			
		1	2	3	4
L	Електропривод	Крокуюча	Колісна	Гусенична	Черв'ячна
M	Гідропривід	Крокуюча	0	0	Черв'ячна
N	Пневмопривод	Крокуюча	0	0	Черв'ячна
P	Аеродинамічний	Крокуюча	Колісна	Гусенична	0

ципу інтеграції приводів з можливістю працювати в будь-яких системах координат, тому комбінації електроприводу L1 (з крокуючою трансмісією) – L3 (колісною) повинні бути залишені.

Більш того, зроблений висновок підтверджується аналогами технічних розв’язань патентних баз даних, а саме патентами на мобільні роботи з електроприводом та такими трансмісіями: США [10] мають крокуючу L1; Росія [11] – колісну L2; США [12] – гусеничну L2. Навпаки, сукупність електроприводу з черв’ячною трансмісією L4 не підтверджується ніякими патентами, тому виключається. Далі застосування гідроприводу M1 та пневматичного приводу N1 з крокуючою трансмісією відображене в патентах Німеччини [13], України [14; 15], а також Росії [16]. Доцільність використання аеродинамічного приводу з крокуючою P1, колісною P2 та гусеничною P3 трансмісіями підтверджується відповідними патентами США [17; 18], а також Росії [19; 20], тому ці морфологічні комбінації ознак залишаються в табл. 3. Тим більше, що ефективність зазначених комбінацій повністю відповідає викладеному вище принципу 3, що передбачає застосування аеродинамічної тяги як засобу протидії гравітаційному навантаженню. Комбінація пневматичного приводу з черв’ячною трансмісією N4 підтверджується патентом Росії [21], а не властиво це комбінації ознак M4 (гідропривід – черв’ячна трансмісія), що підлягає виключенню.

У результаті виконаного аналізу матриця (13) гіпотетичних комбінацій ознак, наведених у табл. 3, перетворюється на вид практично доцільних технічних розв’язань, що підтверджені міжнародними базами патентів:

$$\begin{matrix} L1 & L2 & L3 & 0 \\ M1 & 0 & 0 & 0 \\ N1 & 0 & 0 & N4 \\ P1 & P2 & P3 & 0 \end{matrix} \quad (16)$$

Тоді нова матрична структурна модель визначиться такою формулою:

$$S_3 = L3 \cdot M1 \cdot N2 \cdot P3. \quad (17)$$

Отже, виходячи з цієї формули, можемо сказати, що загальна кількість комбінацій варіантів розв’язань на третьому рівні морфологічного аналізу складе таку величину:

$$N_{03} = \prod_{i=1}^n K_i = 3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 = 3^2 \cdot 2 = 18 \text{ (варіантів)}. \quad (18)$$

Таким чином, варіантами морфологічних ознак (18) є саме ті технічні розв’язання, які не тільки відповідають викладеним вище трьом принципам синтезу мобільних РДО, але й підтверджені аналогами з наведених міжнародних баз даних патентів, що в сукупності є доказом їх інженерної доцільності.

Нарешті, закінчимо морфологічний аналіз на четвертому рівні можливих комбінацій ознак «Трансмісії – Системи зчеплення», представлених у табл. 4. Як і в попередньому випадку (на відміну від перших двох рівнів), таблиця відображає суцільно конструктивні ознаки, що домінують у впливі на техніко-економічні показники експлуатації мобільних РДО. Однак цей рівень аналізу особливо важливий ще й тому, що включає ознаки систем зчеплення робота з поверхнею переміщення, що принципово відрізняє мобільні РДО від звичайних мобільних роботів наземного базування, оскільки саме від виду зчеплення залежить надійність утримання робота на поверхні довільної орієнтації.

Матриця значень показників, наведених у табл. 4, буде мати такий вигляд:

$$\begin{matrix} Q1 & Q2 & Q3 & Q4 & Q5 \\ 0 & R2 & R3 & 0 & 0 \\ 0 & S2 & S3 & 0 & 0 \\ T1 & T2 & T3 & 0 & 0 \end{matrix} \quad (19)$$

Ця матрична структурна модель визначиться такою формулою:

$$S_4 = Q5 \cdot R2 \cdot S2 \cdot T3. \quad (20)$$

Отже, виходячи з формули (20), можемо визначити, що загальна кількість комбінацій варіантів гіпотетично можливих розв’язань складе таку величину:

$$N_4 = \prod_{i=1}^n K_i = 5 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 5 \cdot 2^2 \cdot 3 = 60 \text{ (варіантів)}. \quad (21)$$

Однак, як і в попередніх випадках, тут немає впевненості в тому, що всі отримані варіанти ком-

Таблиця 4

Морфологічна таблиця четвертого рівня аналізу класу «Трансмісії – Системи зчеплення»

Вид трансмісії		Системи зчеплення				
		1	2	3	4	5
Q	Крокуюча	Механічні	Вакуумні	Електромагніти	Суша адгезія	Електроадгезія
R	Колісна	0	Вакуумні	Електромагніти	0	0
S	Гусенична	0	Вакуумні	Електромагніти	0	0
T	Черв’ячна	Механічні	Вакуумні	Електромагніти	0	0

бінацій морфологічних ознак можуть бути реалізовані на практиці навіть із залученням сучасних матеріалів та технологій. Щоби відібрати варіанти технічних розв'язань, сумісних із сучасним рівнем техніки, проаналізуємо їх способом, що аналогічний попередньому рівню, а саме перевіримо відповідність гіпотетичних розв'язань трьом принципам синтезу мобільних РДО, викладеним вище, а також зіставимо ці варіанти з аналогами й прототипами міжнародних патентних баз.

Так, наприклад, трансмісія, що крокує внаслідок невисокої швидкості переміщення порівняно з колісною дасть змогу реалізувати комбінації Q1, Q2 і Q3 (табл. 4), тобто механічні, вакуумні й електромагнітні системи зчеплення відповідно. Ця ж властивість сприяє реалізації повільних систем сухої Q4 й електричної адгезії Q5. Крім того, крокуюча трансмісія в комбінації із зазначеними способами зчеплення повністю задовольняє першим двом із зазначених вище принципів синтезу мобільних РДО, оскільки дає змогу накопичувати потенційну енергію на кожному попередньому кроці та перетворювати її на кінетичну енергію на кожному подальшому кроці переміщення мобільного РДО. Крім того, ця трансмісія дає змогу інтегрувати приводи руху робота, що підтверджується технічними розв'язаннями, відображеними в наведених вище патентах України [14; 15], тому ці комбінації морфологічних ознак повинні бути залишені.

Доцільність комбінацій морфологічних ознак R2 (вакуумні) та R3 (електромагнітні) для колісної трансмісії підтверджується патентами США [22], України [23] та Росії [24]. Комбінація S2 (гусенична трансмісія з вакуумним зчепленням) має реалізацію в мобільній роботизованій системі Gekko швейцарської фірми Serbot AG [25] для очищення похилих поверхонь сонячних панелей, а ознака S3 (гусенична з магнітним зчепленням) підтверджується патентом США [16]. Комбінація T1 черв'ячної трансмісії та механічного зчеплення ілюструє технічний розв'язок [26], так званий зміїний робот Omni Tread для промислової інспекції й нагляду.

Ознаки T2 (черв'ячна з вакуумною трансмісією) і T3 (з електромагнітною) поки що не мають підтвердження, тому повинні бути виключені. Таким чином, матриця (19) матиме такий вигляд:

$$\begin{array}{ccccc}
 Q1 & Q2 & Q3 & Q4 & Q5 \\
 0 & R2 & R3 & 0 & 0 \\
 0 & S2 & S3 & 0 & 0 \\
 T1 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{array} \quad (22)$$

Очевидно, що ця матрична модель визначиться такою формулою:

$$S_4 = Q5 \cdot R2 \cdot S2 \cdot T1. \quad (23)$$

Згідно з цією формулою кількість практично придатних варіантів класу «Трансмисії – Системи зчеплення» складе таку величину:

$$N_{04} = \prod_{i=1}^n K_i = 5 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1 = 5 \cdot 2^2 = 20 \text{ (варіантів)}. \quad (24)$$

У підсумку виконаного морфологічного аналізу отримані варіанти виконань мобільних РДО, які підтверджені міжнародними базами патентів та задовольняють трьом викладеним вище принципам синтезу, отже, є практично доцільними. Так на 1-му рівні аналізу, згідно з формулою (6), число варіантів склало  $N_1 = 25$ ; на 2-му рівні, згідно з виразом (12), –  $N_2 = 16$ ; на 3-му рівні, за формулою (18), –  $N_3 = 18$ , а на 4-му рівні, згідно з формулою (24), –  $N_4 = 20$  варіантів виконань структур мобільних роботів. Тоді первісний морфологічний граф на рис. 1 з урахуванням матричних образів (4), (10), (16) і (22) перетворюється на модифікований вид, наданий на рис. 2. Досягнена модифікація морфологічного графа мобільних РДО дає можливість здійснювати новітні проектні розробки мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі, не марнуючи кошти на апробацію не доцільних з інженерної точки зору (хоча й гіпотетично можливих з огляду на далеко не завжди вдосконалену людську логіку) варіантів виконань РДО. Слід наголосити на тому, що підтвердження тієї чи іншої морфологічної структури мобільних РДО аналогами або прототипами міжнародних баз даних патентів зовсім не означає повтор технічних розв'язань, а дає можливість продукування інноваційних конструкцій, здатних бути винаходами в цій галузі.

Застосований критерій у вигляді порівняння з патентованими технічними розв'язаннями підтверджує тільки відповідність вибраних структур сучасному рівню матеріалів та технологій для їхнього виготовлення, що є неодмінною вимогою патентного відомства будь-якої країни. Більш того, інший критерій відбору варіантів, а саме проектування на морфологічні структури трьох принципів подальшого синтезу мобільних РДО, зазначає напрям удосконалювання конструкцій мобільних роботів довільної орієнтації.

#### Структурний синтез мобільних РДО.

Тепер, коли отримані доцільні з обліком викладених вище критеріїв відбору варіанти виконань мобільних РДО, можна почати морфологічний синтез конкретних моделей роботів та їх конструкцій із застосуванням водночас методів параметричного синтезу. У роботі С.В. Акімова [8] запропонована вдосконалена класифікація методів морфологічного

синтезу, висвітленого в дослідженнях В.М. Одріна [6]. Згідно з модифікованою класифікацією методи морфологічного синтезу поділяються на методи генерації структур та методи їх трансформації. Генерація структури здійснюється за відсутності прототипу, а для трансформації структури, навпаки, необхідна структура, яка підлягає послідовному вдосконалюванню. Методи генерації структур поділяються на методи зондування морфологічної множини й методи морфологічного конструювання. У першому разі вибирається вся технічна система або окремі пристрій хоча б на рівні її підсистем. У другому разі морфологічного конструювання об'єкт створюється поступово. Методи трансформації структури поділяються на методи випадкового блукання й методи цілеспрямованого вдосконалювання прототипу. Слід зазначити, що методи генерації структури орієнтовані на пошук глобального екстремуму, а трансформації структури – локального. На нашу думку, локальні екстремуми більш притаманні рішенням завдань оптимізації параметрів конкретних технологій та пристроїв, оскільки, як правило, мають технічні обмеження незалежних змінних цільових функцій.

Оскільки в нашому разі стосовно мобільних робіт генерація структур уже виконана раніше на основі морфологічного конструювання (модифікований граф структурних зв'язків на рис. 2), перейдемо до трансформації структури на основі методу цілеспрямованого вдосконалювання прототипів, тим більше останній метод припускає пошук не глобального, а локального екстремуму.

*Параметричний синтез мобільних РДО.*

Виходячи з багаторічного досвіду проектування таких машин, як верстатне й конвеєрне встаткування, промислові роботи й маніпулятори, а також створюваних на їхній основі роботизованих технологічних комплексів, можемо стверджувати, що будь-яка машина (одиниця промислового встаткування) розробляється на основі Технічного завдання (ДСТУ 3974-2000), що диктує конкретні чисельні значення параметрів як конструкції, так і режимів функціонування, а останнє означає, що їх оптимізація завжди буде закінчуватися пошуком локальних екстремумів цільових функцій, оскільки апіорі задаються інтервали варіювання незалежних змінних, що входять у цільові функції. Інакше кажучи, під час зміни границь поля

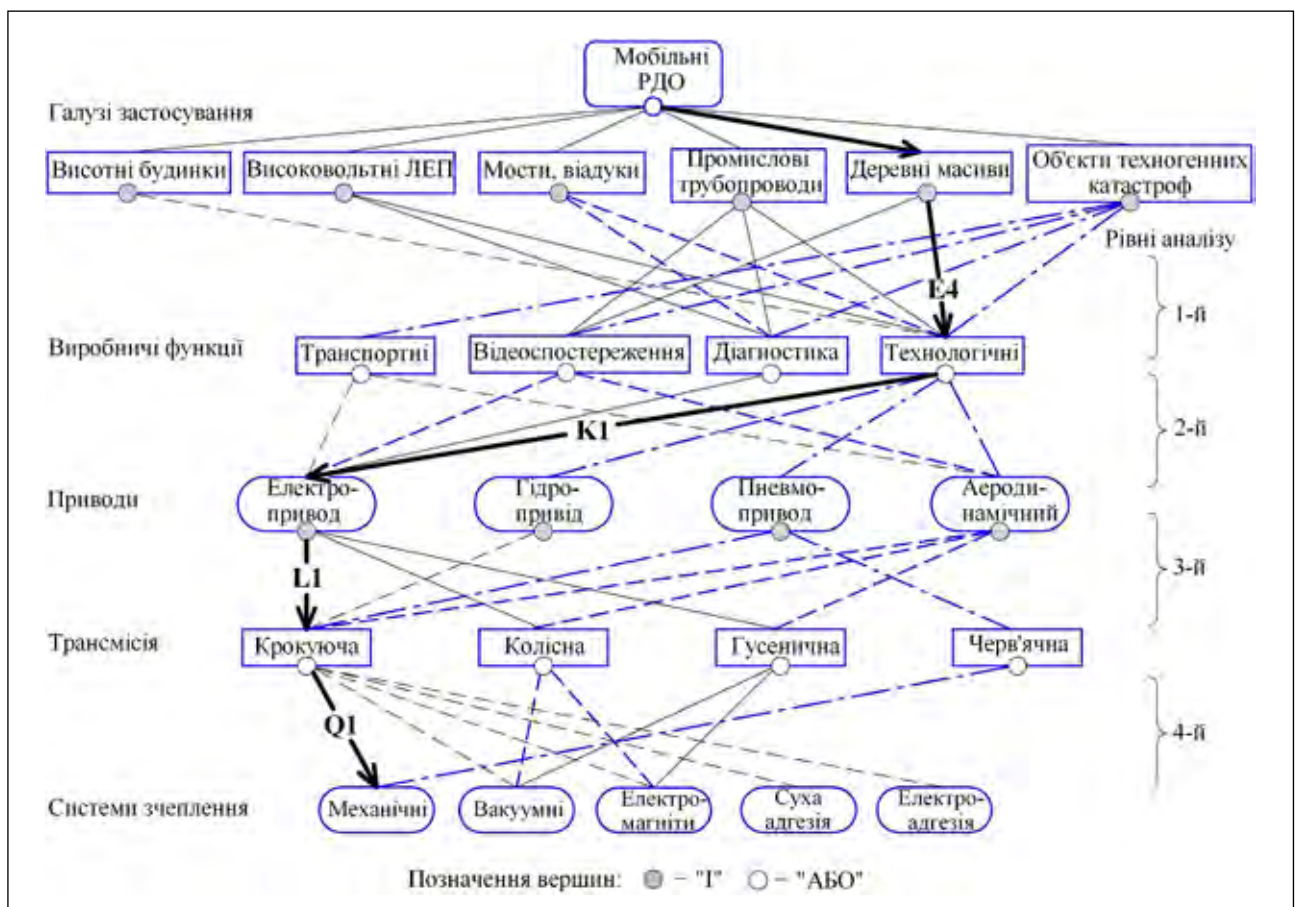


Рис. 2. Модифікація морфологічного графа мобільних РДО



пошуку оптимального розв'язання будуть змінюватися також координати локальних екстремумів, точніше матиме місце пошук квазіоптимальних (тобто найкращих або майже оптимальних) розв'язань задач. Більше того, через відсутність реальної можливості в процесі моделювання будь-якої технічної системи врахувати (навіть із залученням сучасних засобів обчислювальної техніки) всі фактори впливу на об'єкт у вигляді незалежних змінних про глобальні екстремуми не доводиться й говорити.

Як приклад параметричний синтез мобільного РДО виконаємо на основі окремо вибраної морфологічної структури. Припустимо, що технічне завдання передбачає розроблення конструкції мобільного робота для обслуговування паркових деревних масивів, зокрема для обрізки наростів, сучків та віток на деревах. На основі методу морфологічного конструювання виконаємо синтез необхідної структури, а саме створимо необхідну структуру робота, послідовно рухаючись по ребрах (гілках) графа рис. 2. Шукана структура виділена на морфологічному графі рис. 2 товщеними лініями зі стрілками та позначеннями морфологічних ознак E4, K1, L1 і Q1 комбінацій, що відображають такі ознаки: деревні масиви → технологічні операції → електропривод → із крокуючою трансмісією → й механічними захватами

для зчеплення зі стовбуром дерева. Витягнута з графу рис. 2 шукана структура показана на рис. 3 з відображенням цільових функцій для оптимізації її параметрів.

Нехай, наприклад, згідно з технічним завданням, мобільний робот 1 (рис. 3, а), оснащений крокуючою трансмісією 2 з електроприводами 3 (L1) та механічними Q1 захватами 4, повинен переміщатися стовбуром дерева 5 у системі координат XYZ на величину ΔZ, а також виконувати технологічну операцію E4. Нехай остання полягає в тому, щоби дисковою фрезою 6 зрізати деревні нарости 7. Тоді, відповідно до вибраної з морфологічного графа рис. 2 структури на рис. 3, б, оптимізації підлягають такі параметри: режими технологічної операції (різання наростів) → характеристики електроприводу → крокуючої трансмісії → конструктивні параметри механічного захвату.

Оскільки функціонали цільових функцій, що зв'язують критерій оптимізації з незалежними факторами, можуть бути різноманітними та визначаються рівнем кваліфікації конструктора чи математика, то тут для стислості обмежимося відображенням цільових функцій у загальному вигляді, чого поки що достатньо для викладання застосованої методології параметричного синтезу. Таке обмеження виправдане також тим, що процедура обчислення

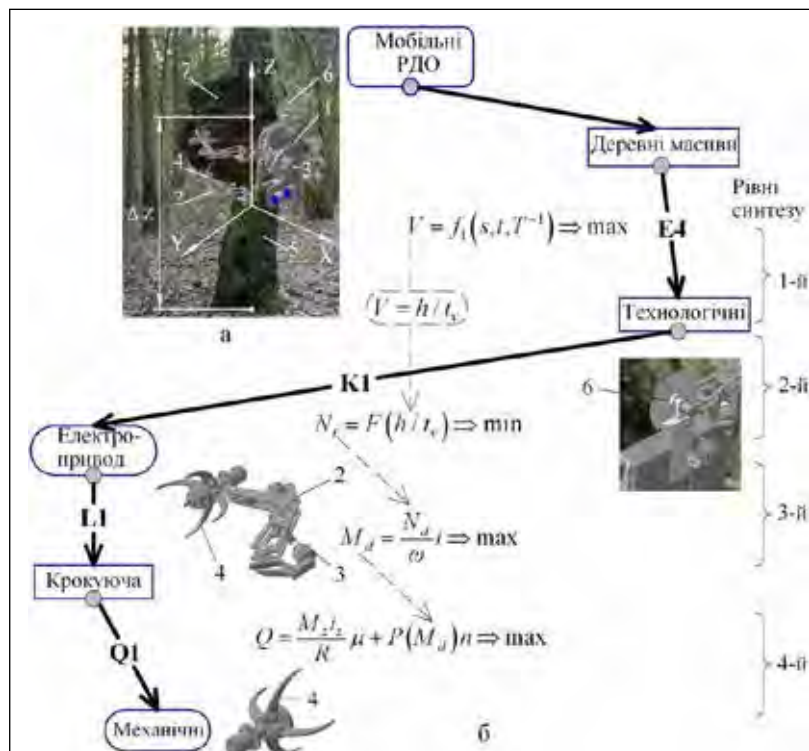


Рис. 3. Структурно-параметрична модель мобільного робота для обрізки дерев

оптимальних або, скоріше, квазіоптимальних значень параметрів може здійснюватися як аналітичними, так і чисельними методами, що в сукупності виходить за рамки цих досліджень.

Тут відобразимо найважливіше, а саме запропоновану модифікацію методики параметричного синтезу [27] для такої багаторівневої ієрархічної структури, як мобільний РДО. Пропонована модифікація полягає в тому, що слід відобразити не тільки наявність зв'язку критеріїв оптимізації з незалежними змінними в межах цільових функцій, що вже відомо та істотно (тобто тривіально), але й зв'язок самих цільових функцій на різних рівнях технічної системи (позначення штриховими стрілками на рис. 3, б), в цьому разі – структури мобільного РДО.

Отже, на першому рівні параметричного синтезу для морфологічної комбінації Е4 цільова функція, що включає режими технологічної операції, може бути представлена в загальному вигляді як функція швидкості різання деревини дисковою фрезою:

$$V = f_1(s, t, T^{-1}) \Rightarrow \max, \quad (25)$$

за таких обмежень:  $s = f_{11}(\sigma)$ ;  $t_1 \leq t_i \leq t_n$ , де  $s$  – величина подачі на зуб дискової фрези;  $\sigma$  – межа міцності деревини певної породи;  $t$  – глибина різання в межах діапазону значень  $t_1 \dots t_n$ ;  $T$  – період стійкості інструмента.

На другому рівні синтезу для морфологічної комбінації ознак К1 (технологічна функція – привод) цільову функцію можна записати як функцію потужності  $N_i$  (кВт) виконання технологічної операції (у цьому разі – різання):

$$N_i = F(h / t_v) \Rightarrow \min, \quad (26)$$

де  $F$  – зусилля різання деревини;  $h$  – товщина або діаметр об'єкта різання (вітки, сука, наросту);  $t_v$  – час різання; оскільки  $(h / t_v) = V$ , то можна записати як  $N_i = FV \Rightarrow \min$ , що відобразить взаємозв'язок першого та другого рівнів синтезу.

Для третього рівня синтезу морфологічної комбінації ознак L1 (привод – трансмісія) цільову функцію можна представити у вигляді крутного моменту  $M_d$  електропривода:

$$M_d = \frac{N_d}{\omega} i \Rightarrow \max; \text{ при } N_d = M_d \omega \geq N_i, \quad (27)$$

де  $N_d$  і  $\omega$  – потужність і кутова швидкість двигуна;  $i$  – передатне відношення підсилювально-передатної ланки (редуктора).

На четвертому рівні параметричного синтезу для комбінації Q1 (привод – система зчеплення з поверхнею переміщення робота) цільову функцію також бажано зв'язати з попереднім функціоналом. Це можемо виконати, записавши у вигляді

цільової функції вираження для сили зчеплення  $Q$  механічного захвату з поверхнею переміщення мобільного РДО:

$$Q = \frac{M_z i_z}{R} \mu + P(M_d) n \Rightarrow \max; \quad Q \geq (F + mg) K, \quad (28)$$

де  $M_z$  і  $i_z$  – крутний момент і передатне відношення приводу захвату;  $R$  – виліт (довжина) пазурів захвату;  $\mu$  – коефіцієнт тертя ковзання між матеріалом пазурів захвату й поверхнею дерева;  $P$  – зусилля однієї ноги з числа  $n$  ланок крокуючої трансмісії як функція моменту двигуна  $M_d$  у вираженні (27);  $m$  – маса робота;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $K$  – коефіцієнт запасу (1,2...1,5) для врахування інерційних перехідних процесів.

Зазначені цільові функції параметричного синтезу спрощені та аж ніяк не є вичерпними, тому вони можуть бути доповнені й змінені, а особливо тоді, коли буде поставлено аналогічне завдання оптимізації для інших гілок морфологічного графа рис. 2. На цьому етапі, згідно з методом параметричного синтезу, надзвичайно важливим є параметричний взаємозв'язок цільових функцій оптимізації компонентів структури як ієрархічної багаторівневої технічної системи, показаної на прикладі мобільного робота, зокрема робота для обрізки дерев. Більш того, вкрай бажаний не тільки взаємозв'язок функціоналів на різних рівнях системи, але й функціональний зв'язок між їхніми незалежними змінними з накладеними на них обмеженнями, які можуть бути як лінійними, так і нелінійними.

Створення подібних формалізованих моделей, тобто у взаємозв'язку цільових функцій на різних рівнях ієрархії системи, дасть змогу максимально підвищити їхню адекватність реальним умовам експлуатації мобільних РДО. Методи розв'язування задачі пошуку локальних екстремумів критеріїв оптимізації на кожному з рівнів досить відомі й можуть включати як аналітичні, так і чисельні методи. В будь-якому разі пошук квазіоптимальних розв'язань, безумовно, сприяє ефективності проектування, отже, експлуатації мобільних роботів довільної орієнтації в технологічному просторі як нового виду засобів виробництва.

**Висновки.** На основі проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

1) викладений морфологічний аналіз мобільних роботів, заснований на таких критеріях відбору, як принципи раціонального проектування й відповідність міжнародним базам патентів, дає змогу знаходити найбільш раціональні комбінації морфологічних ознак у вигляді варіантів виконання мобільних роботів, відповідних сучасному рівню технологій та матеріалів для їхнього виробництва;

2) структурний синтез конструктивних виконань роботів, заснований на послідовному проходженні так званих ребер (гілок) морфологічного графа І/АБО, дає змогу формувати структури мобільних РДО цільового технологічного призначення;

3) модифікація параметричного синтезу, що полягає у взаємозв'язку цільових функцій на різних рівнях синтезу, дає можливість шляхом пошуку квазіоптимальних розв'язань, суттєво підвищити ефективність проектування мобільних роботів, отже, їхньої майбутньої експлуатації.

#### Список літератури:

1. Raju D.D, Jaju S.B. Developments in wall climbing robots: a review. *International journal of engineering research and general science*. 2014. № 2. P. 33–42.
2. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Мобильные роботы: проблемы управления и оптимизации движений. *XII Всероссийское совещание по проблемам управления* : труды ВСПУ 2014 (Москва, 16–17 июня 2014 года). Москва, 2014. С. 67–78.
3. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. *Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning*. Springer Heidelberg, New York, 2012. P. 37–46.
4. Градецкий В.Г., Вешников В.Б., Калинин С.В., Кравчук Л.Н. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. Москва : Наука, 2001. 360 с.
5. Козляков В.В., Раков Д.Л. Поиск новых технических решений в машиностроении на ранних этапах проектирования. *Анализ и синтез машин*. 2008. С. 2–11.
6. Одрин В.М. Метод морфологического анализа технических систем. Москва : ВНИИПИ, 1989. 312 с.
7. Кузнецов Ю.Н., Герра Ж.А., Хамуйела Т.О. Морфологический синтез станков и их механизмов : монография. Киев : ООО «ГНОЗИС», 2012. 416 с.
8. Акимов С.В. Введение в морфологические методы исследования и моделирование знаний предметной области. URL: <http://www.structuralist.narod.ru/about/about.htm> (дата звернення: 06.02.2019).
9. Polishchuk M.N. Principles of designing mobile robots. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2018. № 22. P. 31–37.
10. Walking machine: patent US 4527650: Int. Cl. B62D 57/02. Appl. No. 476629; Filed: Mar. 18, 1983; Date of Patent: Jul. 09, 1985.
11. Транспортное средство и способ его передвижения : патент RU 2369514 Россия : МПК В62D57/032. № 2008101305/11; заяв. 09.01.2008; опубл. 10.10.2009.
12. Climbing vehicle with suspension mechanism : Patent US 9428231 Int. Cl. B62D 55/00. Appl. No. 179464; Filed: Feb. 12, 2014; Date of Patent: Aug. 30, 2016.
13. Walking mechanism and method for moving devices : Patent DE 4107314: Int. Cl. B62D 57/032. Filed: 07. 03.91; Date of Patent: 10.09.92.
14. Спосіб переміщення педипуляторів крокуючого робота та пристрій для його здійснення : Патент UA 111021 Україна: МПК В62D57/032. № a201411741; заявл. 30.10.2014; опубл. 10.03.2016, Бюл. № 5.
15. Крокуючий мобільний робот : Патент UA 117065 Україна : МПК В62D 57/032. № a201701440; заявл. 16.02.2017; опубл. 11.06.2018. Бюл. № 11.
16. Транспортное средство для перемещения по поверхностям произвольной пространственной ориентации : патент RU 2053911 Россия : МПК В62D57/032. № 5049217/11; заявл. 23.06.1992; опубл. 10.02.1996.
17. Climbing robot vehicle : Patent US 9738337: Int. Cl. B62D 57/024. Appl. No. 14/906,451; Filed: Jan. 28, 2015; Date of Patent: Aug. 22, 2017.
18. Air lifted and propelled vehicle : Patent US 4643268: Int. Cl. B60V 1/14. Appl. No. 640319; Filed: Aug. 13, 1984; Date of Patent: Feb. 17, 1987.
19. Мобильный шагающий робот : патент RU 2057046 Россия : МПК В 62D 57/032. № 5034754/11; заяв. 09.03.1992; опубл. 27.03.1996.
20. Шагающая опора : патент RU 2086450 Россия : МПК В62D57/032. № 94024222/11; заявл. 29.06.1994; опубл. 10.08.1997.
21. Транспортное средство для передвижения в разного рода грунтах «червяк» : Патент RU 2260542 Россия: МПК В62D57/032. № 2003134920/11; заявл. 03.12.2003; опубл. 20.09.2005.
22. Climber robot : Patent US 5551525 Int. Cl. B62D 57/032. Appl. No. 293498; Filed: Aug. 19, 1994; Date of Patent: Sep. 03, 1996.
23. Захват крокуючого робота : Патент UA 117979 Україна : МПК В65Н 5/08. № u201702363; заявл. 14.03.2017 опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.
24. Транспортное устройство для движения по вертикальным металлическим поверхностям : Патент РФ 101683 Россия : МКИ В62D 57/04. № 2010140051/11; заяв. 29.09.2010; опубл. 27.01.2011. Бюл. № 3.
25. Роботизированная система Gekko швейцарской фирмы Serbot AG. URL: <https://www.designworldonline.com/cleaning-solar-panels-with-a-robotic-gecko> (дата звернення: 09.02.2019).

26. Granosik G., Hansen M.G., Borenstein J. The Omni Tread Serpentine Robot for Industrial Inspection and Surveillance. *International Journal on Industrial Robots, Special Issue on Mobile Robots*. 2005. Vol. IR32-2. March 18th. P. 139–148.

27. Поліщук М.М., Науменко Ю.О. Вибір методу оптимізації критеріїв багаторівневої складної агрегованої системи. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2010. № 16 (36). С. 84–88.

### **МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ**

*В статье впервые осуществлен морфологический анализ структур, предоставлена модифицированная методика параметрической оптимизации мобильных роботов произвольной ориентации в технологическом пространстве. Отличие предложенных моделей заключается в отображении взаимосвязи целевых функций оптимизации параметров мобильных роботов на разных уровнях иерархии их структур. Предложены критерии оптимизации конструктивных и технологических параметров на примере мобильного робота для обслуживания древесных лесных и парковых массивов.*

**Ключевые слова:** мобильные роботы, роботы вертикального перемещения, альпинистские роботы, морфологический анализ, параметрический синтез.

### **MORPHOLOGICAL ANALYSIS AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF MOBILE ROBOTS OF ARBITRARY ORIENTATION**

*In the article a morphological analysis of structures was first carried out and a method of parametric optimization of mobile robots of arbitrary orientation in the technological space was presented. The difference between the proposed models illustrates the relationship of the objective functions for optimizing the parameters of mobile robots at different levels of the hierarchy of their structures. Criteria for optimization of design and technological parameters are proposed on the example of a mobile robot for servicing forest and park arrays.*

**Key words:** mobile robots, walking mechanisms, robots of vertical movement, climbing robots, morphological analysis, parametric synthesis.

## ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31

**Ковальчук Ю.О.**

Уманський національний університет садівництва

**Оляднічук Р.В.**

Уманський національний університет садівництва

**Ковальчук А.О.**

Харківський національний університет повітряних сил

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ПОВЕРХНЕВІ ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ СТАЛІ 45

*Проаналізовано процес формування мікроструктури в зоні лазерної обробки для сталі 45. Показано залежність залишкових напружень у центрі зміцненої смуги від потужності випромінювання. Визначено вплив швидкості лазерної обробки на поверхневі залишкові напруження. Наведено розподіл залишкових напружень поперек термозміцнених смуг за умов різних значень коефіцієнта перекриття. Показано значне зменшення інтенсивності зносу оброблених лазером зразків зі сталі 45 порівняно з іншими видами зміцнення.*

**Ключові слова:** метод поверхневої лазерної обробки, зона лазерного впливу, зміцнення, гартування, залишкові напруження.

**Постановка проблеми.** Питання покращення механічних властивостей та збільшення ресурсу виробітку деталей не втрачає своєї актуальності серед виробників сільськогосподарської техніки. Забезпечення високих експлуатаційних характеристик деталей, які найбільше піддаються зносу та виходять із ладу, є однією із першочергових задач, що стоять перед виробниками сільськогосподарських машин.

Різні деталі тракторів, комбайнів, засобів механізації тваринництва та інших сільськогосподарських машин виготовляються зі сталі 45 та повинні задовольняти відповідні вимоги щодо міцності та зносостійкості.

Одним із методів зміцнення деталей сільськогосподарської техніки є поверхнева лазерна обробка. Для ефективного застосування даного методу необхідно мати чіткі уявлення про внутрішні процеси в поверхневому шарі зміцнюваних зразків, що відбуваються внаслідок впливу лазерного випромінювання.

Експлуатаційні характеристики деталей зі сталі 45 у випадку застосування лазерної обробки безпосередньо пов'язані, зокрема, також із залишковими напруженнями на їх поверхні.

Тому системне дослідження впливу лазерного випромінювання на зміцнювану поверхню матері-

алу стосовно, зокрема, поверхневих залишкових напружень на даний момент є актуальним та важливим.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішення задач, пов'язаних із визначенням властивостей сталей, що зазнають впливу лазерного випромінювання, привертає увагу багатьох науковців та вчених. Зокрема, цими питаннями займалися О.Г. Григор'янц, В.С. Черненко, Е.В. Харанжевський та інші, які вивчали вплив лазерного випромінювання на поверхню сталевих зразків у різних випадках та для різних матеріалів [1–3].

Зміцненням різних деталей сільськогосподарської техніки за допомогою лазерного випромінювання в останні роки займалися В.П. Бірюков, І.Ф. Буханова, В.В. Дивинський та інші [4–6].

Дослідженням структури та властивостей зон перекриття в результаті лазерної обробки та підвищення експлуатаційних характеристик деталей із залізвуглецевих сплавів шляхом застосування оптоволоконного лазера останнім часом займався, зокрема, П.А. Огін [7].

Залишкові напруження на поверхні залізвуглецевих сплавів, їх значення та знаки під час лазерної обробки розглядали у своїх працях

А.Г. Григорьянц [1], В.С. Майоров [8] та інші вітчизняні та закордонні вчені.

Дослідження залишкових напружень унаслідок лазерного зміцнення на поверхні сталі 45, з якої виготовляють велику кількість деталей сільськогосподарських машин, охоплюють певною мірою обмежене коло випадків, у різних авторів можуть містити суперечливі дані та потребують подальшої систематизації та узагальнення.

**Постановка завдання.** Метою роботи є визначення впливу лазерної обробки на властивості сталі 45, аналіз особливостей формування мікроструктури у відповідних зразках та дослідження розподілу залишкових напружень на поверхні оброблюваної сталі, що дозволить здійснити підбір необхідних параметрів процесу лазерного зміцнення для забезпечення високих експлуатаційних характеристик відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На поверхні деталей, зокрема зі сталі 45, зміцнених безперервним або імпульсним лазерним випромінюванням, виникають неоднорідно розподілені залишкові напруження. Розміри області зі змінними напруженнями значно більші, ніж зона лазерного впливу, причому має місце певна симетрія відносно центру зміцненої смуги чи плями. Величина та знак залишкових напружень залежать від режимів лазерної обробки, хімічного складу сталі та деяких інших факторів. Вони визначають такі властивості деталей, як зносостійкість, втомні характеристики, залишкові деформації тощо.

Під час формування напружень у термозміцненому шарі відбуваються два конкуруючі процеси. З одного боку, розвиваються розтягувальні напруження, викликані пластичною деформацією у процесі утрудненої усадки нагрітих областей  $\sigma_{\text{терм}}$ . З іншого боку, утворення мартенситу супроводжується збільшенням об'єму області, яка зазнала перетворень, що, у свою чергу, сприяє виникненню стискувальних напружень  $\sigma_{\text{фаз}}$ . Величина і знак залишкових напружень  $\sigma_{\text{зал}}$  залежать від співвідношення термічних  $\sigma_{\text{терм}}$  та фазових  $\sigma_{\text{фаз}}$  напружень. При  $\sigma_{\text{терм}} > \sigma_{\text{фаз}}$  на поверхні формуються розтягувальні напруження, а при  $\sigma_{\text{терм}} < \sigma_{\text{фаз}}$  – стискувальні.

Якщо після зміцнення відбулось мартенситне перетворення (це може бути обробка без оплавлення або з невеликим оплавленням), то в центрі смуги формуються стискувальні напруження. Збільшення об'ємного ефекту під час мартенситного перетворення за рахунок підвищення концентрації вуглецю або швидкості охолодження в сталях призводить до зростання частки стискувальних напружень.

У процесі обробки поверхні сталі 45 безперервним CO<sub>2</sub>-лазером потужністю 0,5 кВт зі швидкістю 33 мм/с збільшення твердості в опроміненій смугі не спостерігається, оскільки під час обробки нагрів відбувається при температурі нижче температури фазових перетворень. При цьому на поверхні в опроміненій смугі мають місце залишкові розтягувальні напруження  $\sigma_{\text{зал}} = 250 \dots 430$  МПа, зумовлені пластичними деформаціями внаслідок нерівномірного нагрівання та охолодження під час обробки. Під час збільшення потужності лазерного випромінювання метал у зоні обробки нагрівається до температур вище температури фазових перетворень (до оплавлення), на стадії охолодження відбувається мартенситне перетворення, що викликає збільшення об'єму та виникнення залишкових стискувальних напружень.

У центрі оплавленої лазером смуги сталі 45 абсолютні значення стискувальних напружень знаходяться в діапазоні 110...280 МПа (рис. 1) [1]. Найбільші стискувальні напруження зафіксовані при  $P = 1$  кВт, коли обсяг рідкої складової мінімальний та швидкість її охолодження максимальна. При  $P = 2 \dots 3$  кВт на поверхні сталі 45 стискувальні напруження  $\sigma_{\text{зал}}$  мають абсолютні значення на 50...100 МПа більше, ніж на поверхні заліза, що пояснюється впливом вуглецю.

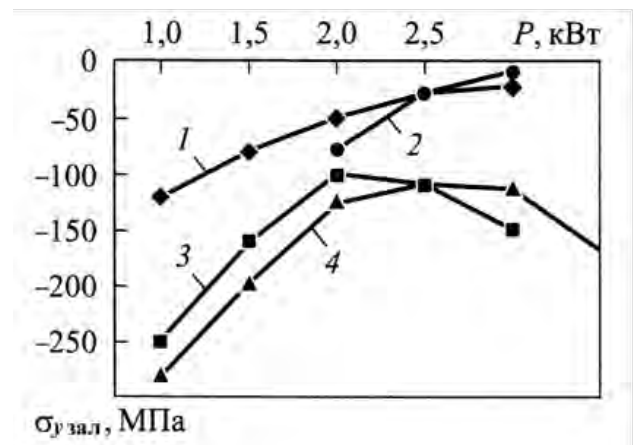


Рис. 1. Зміна залишкових напружень у центрі зміцненої смуги в залежності від потужності випромінювання для різних залізовуглецевих сплавів:

1 – сталь У8; 2 – залізо; 3 – сталь 40Х; 4 – сталь 45

Значний вплив на розподіл залишкових напружень під час термозміцнення чинить швидкість обробки. При малій швидкості обробки (8 мм/с) в центрі оплавленої смуги сталі 45 формуються розтягувальні напруження  $\sigma_{\text{зал}} = 130$  МПа, а під час збільшення швидкості обробки напруження в

центрі смуги переходять із розтягувальних в стискувальні (рис. 2) [1].

Під час обробки з перекриттям плям або смуг величина, знак та характер розподілу залишкових напружень значно змінюються. Розподіл залишкових напружень поперек термозміцнених смуг на нормалізованій сталі 45 при різних значеннях коефіцієнта перекриття смуг  $K_n = (b - S) / b$  представлено на рис. 3 [1]. Початок координат обрано на краю останньої смуги. У процесі обробки без перекриття смуг ( $K_n = -0,8; -0,3$ ) на їх поверхні є стискувальні напруження, а між смугами – розтягувальні.

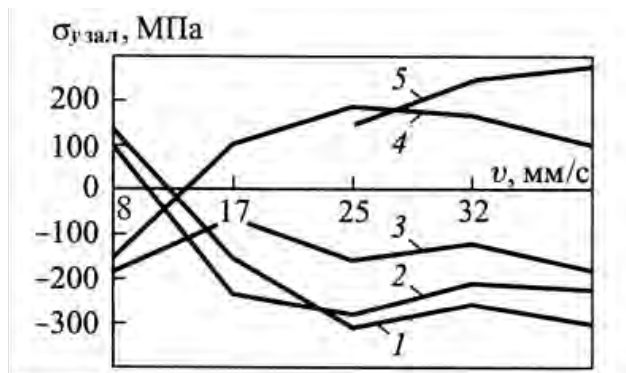


Рис. 2. Зміна залишкових напружень у центрі зміцненої смуги в залежності від швидкості обробки при  $P = 1$  кВт: 1 – сталь 45; 2 – 40X; 3 – У8; 4 – ХВГ; 5 – Р18

При  $K_n = -0,1...0,1$ , коли остання смуга надає термічний вплив на попередню смугу, між ними формуються стискувальні напруження. У цьому випадку остання смуга надає термічний вплив на зону неповного гарту попередньої смуги, де наявна структура мартенситу із троостито-феритною сіткою. У процесі такого впливу в результаті дифузії відбувається насичення деяких ділянок твердого розчину вуглецем, крім того, можливий розпад залишкового аустеніту. Перетворення такого типу, мабуть, і призводять до формування стискувальних напружень.

Зі зростанням коефіцієнта перекриття до  $K_n = 0,2$ , коли остання смуга впливає на зону з мартенситною структурою попередньої смуги, напруження в області перекриття збільшуються.

Таким чином, величина і діапазон зміни напружень під час обробки з перекриттям залежать від режимів обробки та, перш за все, від ступеня перекриття і потужності випромінювання. Із підвищенням ступеня перекриття діапазон зміни напружень на поверхні зменшується.

Порівняно зі звичайним гартуванням та з гартуванням із відпуском лазерне гартування забезпечує в декілька разів меншу інтенсивність зносу зразків зі сталі 45 унаслідок особливостей

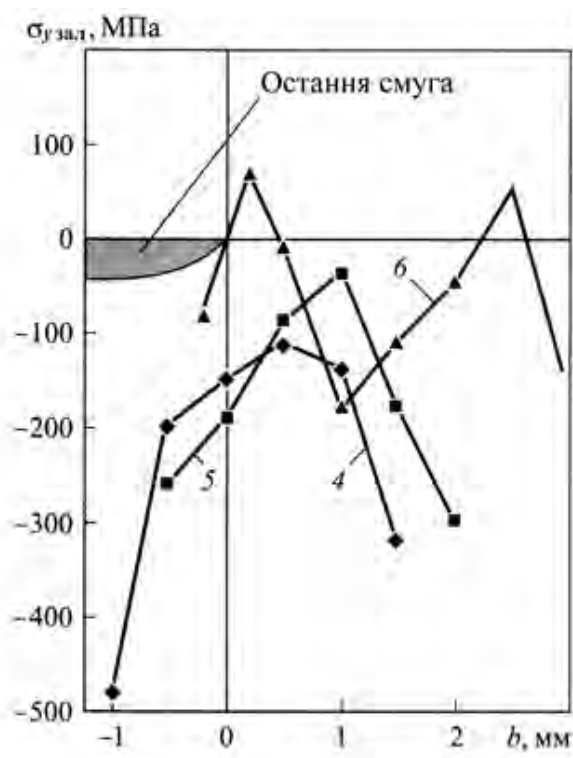
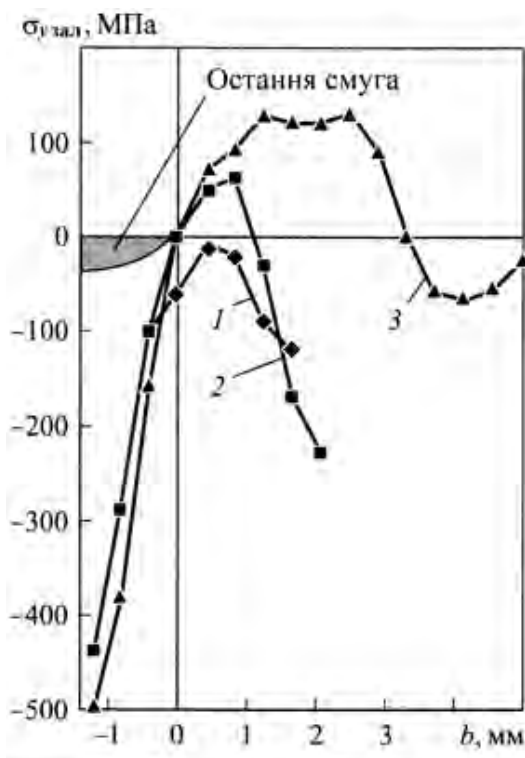
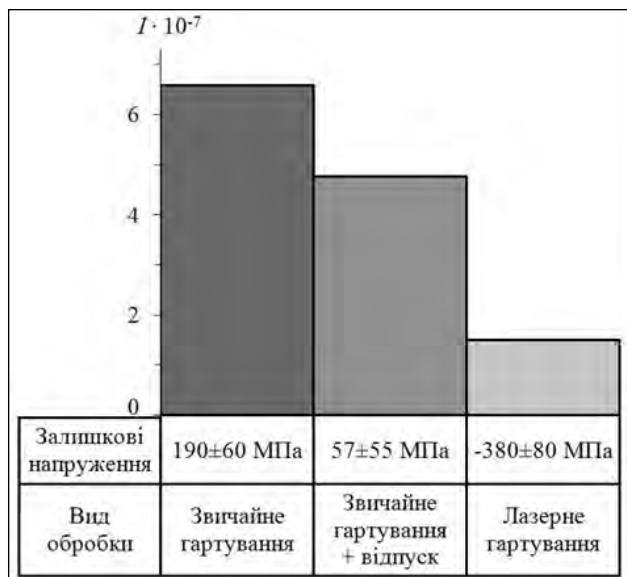


Рис. 3. Розподіл залишкових напружень поперек термозміцнених смуг після обробки сталі 45 при різних коефіцієнтах перекриття  $K_n$ : 1 – -0,1; 2 – -0,3; 3 – -0,8; 4 – 0,1; 5 – 0,2; 6 – 0,6

залишкових напружень у їх поверхневому шарі [1] (рис. 4).



**Рис. 4.** Інтенсивність зносу термозміцнених зразків зі сталі 45 при сухому терті в залежності від максимальних залишкових напружень у їх поверхневому шарі

**Висновки.** У даній роботі здійснювався аналіз особливостей формування мікроструктури в зоні лазерного впливу для сталі 45 та виконувалось дослідження залишкових напружень на її поверхні в залежності від потужності випромінювання лазера, швидкості обробки досліджуваних зразків та коефіцієнту перекриття зміцнених смуг.

Під час збільшення потужності лазерного випромінювання метал у зоні обробки нагрівається до температур вище температури фазових перетворень і відбувається збільшення об'єму та виникнення залишкових стискувальних напружень.

За умов малої швидкості обробки в центрі оплавленої смуги сталі 45 формуються розтягувальні напруження, а під час збільшення швидкості обробки напруження в центрі смуги переходять із розтягувальних в стискувальні.

У процесі обробки смуг без перекриття на їх поверхні є стискувальні напруження, а між смугами – розтягувальні. При  $K_n = -0,1...0,1$ , коли остання смуга надає термічний вплив на попередню смугу, між ними формуються стискувальні напруження. Зі зростанням коефіцієнта перекриття до  $K_n = 0,2$  напруження в області перекриття збільшуються. Із підвищенням ступеня перекриття діапазон зміни напружень на поверхні зменшується.

Порівняно з іншими видами зміцнення лазерне гартування забезпечує в декілька разів меншу інтенсивність зносу зразків зі сталі 45 унаслідок особливостей залишкових напружень у їх поверхневому шарі.

Отже, використовувана вітчизняними виробниками сільськогосподарської техніки сталь 45 може ефективно піддаватись лазерній обробці, що дасть змогу забезпечити значне підвищення експлуатаційних характеристик відповідних деталей.

#### Список літератури:

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца ; 2-е изд., стереотип. Москва, 2008. 664 с.
2. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. Променеві методи обробки : навч. посібник. Київ, 2008. 166 с.
3. Харанжевский Е.В. Кривилёв М.Д. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество : учеб. пособие / под ред. П.К. Галенко. Ижевск, 2011. 187 с.
4. Бирюков В.П. Повышение износостойкости деталей сельскохозяйственной техники и почвообрабатывающих орудий лазерным упрочнением и наплавкой. *Лазерные технологии в сельском хозяйстве : Тематический сборник*. Москва, 2008. С. 256–264.
5. Буханова И.Ф., Дивинский В.В., Журавель В.М. Применение лазерного излучения для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственного машиностроения. *Лазерные технологии в сельском хозяйстве : Тематический сборник*. Москва, 2008. С. 264–270.
6. Ковальчук Ю.О., Пушка О.С., Войтків А.В. Вплив поглинаючих покриттів на глибину лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки зі сталі 45. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»*. 2017. Вип. 30. С. 16–21.
7. Огин П.А. Структура и свойства зон перекрытия при лазерной закалке сталей и чугунов. *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2015. № 2(32-2). С. 130–135.
8. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. Москва, 2009. 664 с.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ  
НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ СТАЛИ 45**

*Проанализирован процесс формирования микроструктуры в зоне лазерной обработки для стали 45. Показана зависимость остаточных напряжений в центре упрочненной полосы от мощности излучения. Определено влияние скорости лазерной обработки на поверхностные остаточные напряжения. Приведено распределение остаточных напряжений поперек термоупрочненных полос при различных значениях коэффициента перекрытия. Показано значительное уменьшение интенсивности износа обработанных лазером образцов из стали 45 по сравнению с другими видами упрочнения.*

**Ключевые слова:** метод поверхностной лазерной обработки, зона лазерного воздействия, упрочнение, закаливание, остаточные напряжения.

**RESEARCH OF LASER STRENGTHENING EFFECT  
ON SURFACE RESIDUAL STRESSES OF STEEL 45**

*The process of forming a microstructure in the laser treatment zone for steel 45 is analyzed. The dependence of the residual stresses in the center of the hardened strip on the radiation power is shown. The effect of laser processing speed on surface residual stresses is determined. The distribution of residual stresses across thermally strengthened strips is given for different values of the overlap coefficient. A significant decrease in the wear intensity of laser-treated steel 45 samples compared with other types of strengthening has been shown.*

**Key words:** method of surface laser treatment, laser treatment zone, hardening, tempering, residual stresses.

**Нечасв В.П.**

Криворізький національний університет

**Рязанцев А.О.**

Криворізький національний університет

## ТЕХНОЛОГІЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАЗМОВОГО ЗМІЦНЕННЯ НАВАНТАЖЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

*Стаття присвячена підвищенню зносостійкості великомодульних зубчастих передач шляхом застосування інноваційного методу поверхневого плазмового зміцнення (ППЗ) робочих поверхонь зубів. Експериментально досліджено процес ППЗ, зроблена оцінка отриманих фізико-механічних властивостей та твердості оброблюваного матеріалу під час плазмового нагрівання. Проведено розрахунки на довговічність за параметром зношення. Встановлено, що застосування даного способу термічної обробки збільшує зносостійкість у 2,28 рази. Розроблено та створено комплекс спеціалізованого обладнання для реалізації технологічної схеми ППЗ робочих поверхонь зубчастих передач без оплавлення.*

**Ключові слова:** абразивне зношення, поверхнєве плазмове зміцнення, структурно-фазові перетворення, концентроване джерело нагрівання.

**Постановка проблеми.** Одною з основних умов, якій має задовольняти технологічне обладнання, є його безвідмовна робота з необхідною надійністю та довговічністю відповідно до технічних умов експлуатації протягом заданого періоду часу. У гірничій промисловості знайшли широкого розповсюдження великомодульні відкриті передачі зовнішнього зачеплення, що входять до складу рудорозмельних млинів. Ключовими питаннями під час проектування і виготовлення зубчастих передач є вибір матеріалу і способу його зміцнення. Знос зубів є основним видом руйнування зубів відкритих передач. Запиленість робочої зони ставить відкриті зубчасті передачі в досить несприятливі умови роботи. Пил, що містить велику кількість твердих абразивних частинок, потрапляє на робочі поверхні зубів, змішується з мастилом і викликає їх інтенсивне зношування.

Аналіз пошкоджуваності зубчастих коліс дозволяє зробити припущення, що передчасний їх вихід з ладу зумовлений головним чином процесами в поверхневих шарах. Контактна витривалість поверхневого шару характеризується здатністю матеріалу протистояти розвитку викришування на робочій поверхні, що сприймає змінні контактні навантаження, і визначається конструктивними і технологічними факторами. Зміцнювальні технології формують структуру поверхневого шару, створюють основний рівень зміцнення зубів коліс, що визначає їх працездатність.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Найбільший інтерес мають дослідження, спрямовані на встановлення загальних закономірностей абразивного зношення. Значний внесок до вирішення проблеми підвищення працездатності зубчастих передач конструкторськими, технологічними й експлуатаційними заходами присвячено безліч досліджень, що були проведені А.І.Беляєвим, В.М.Кудрявцевим, М.М.Малишевим, В.В. Орловим, О.І. Петрусевичем, Е.В. Рижовим, Д.Л. Юдіним, В.А. Гавриленко, В.К. Кудрявцевим, І.В. Крагельским та рядом іноземних вчених [1–5].

Аналіз літературних даних з проблеми дослідження свідчить про те, що наявні рекомендації по критеріях граничних станів високонавантажених зубчастих передач суперечливі та не повною мірою враховують взаємозв'язок між характеристиками контактних пошкоджень зубів і експлуатаційними властивостями передач під час комплексної оцінки факторів, що впливають на довговічність відкритих зубчастих передач, в тому числі параметрів зміцнених робочих ділянок зубчастих коліс.

Існують різні способи поверхневого зміцнення, що відрізняються способом нагріву, охолодження і розподілом температури (газополум'яна, індукційна, імпульсна). Основною відмінною особливістю методів поверхневого зміцнення висококонцентрованими джерелами нагріву є можливість отримання швидкостей нагріву та охолодження матеріалів, які на кілька порядків перевищують значення, характерні для традиційних мето-

дів зміцнення, що сприяє отриманню зміцнених шарів з недосяжним раніше рівнем експлуатаційних властивостей.

Перспективним напрямом підвищення зносостійкості робочих поверхонь зубів великомодульних зубчастих коліс є зміцнювальна термічна обробка робочої поверхні концентрованим потоком енергії, а саме плазмовим струменем [6]. Питання досліджень та розробок технологій плазмового зміцнення висвітлені в роботах Л.К. Лещинського, В.П. Токмакова, А.Г. Григор'янца, В.С. Крапошина, М.І. Анякіна, А.А. Бердникова, С.С. Самотугіна, Х.М. Рахімянова [7–9]. Однак тут необхідно враховувати, що технології поверхневого зміцнення мають свої специфічні особливості, і їх результативність залежить від врахування різноманітних факторів, що відображують як саму деталь, її хімічний склад, габарити, геометричну форму, вихідний стан поверхні, так і умови експлуатації. Проведений аналіз показує перспективи плазмового нагрівання, але немає відомостей і розробок, які можна застосувати до великомодульних зубчастих передач.

**Формулювання цілей статті.** Інтерес дослідників до проблеми використання низькотемпературної плазми для термічної й хіміко-термічної обробки сталей і сплавів об'єктивно свідчить на користь цього концентрованого джерела енергії (КДЕ), що володіє очевидними перевагами порівняно з іншими різновидами. Однак незважаючи на значне число робіт у цій області, вона залишається недостатньо вивченою, що негативно позначається на темпах практичного використання плазмового зміцнення.

Таким чином, метою роботи є підвищення зносостійкості контактних поверхонь зубчастих передач шляхом поверхневого плазмового зміцнення (ППЗ). Сформульована мета зумовила необхідність розв'язання таких задач: експериментальне дослідження довговічності зубчастих передач, що пройшли ППЗ, їх розрахунки на довговічність за параметром зношення та аналіз структури, фазового складу та твердості поверхневого шару; розробка й створення комплексу оригінального спеціалізованого обладнання для реалізації технологічної схеми ППЗ робочих поверхонь зубів.

**Виклад основного матеріалу.** Ефект від плазмового зміцнення визначається підвищенням експлуатаційних властивостей деталі завдяки зміні фізико-механічних характеристик поверхневого шару, внаслідок утворення специфічної структури і фазового складу металу, а також отримання на поверхні залишкових напружень. Структурні

перетворення в цілому відповідають тим, що відбувається при об'ємному гартуванні, однак високі швидкості нагріву і охолодження викликають зміну співвідношень між структурними складниками, зміну їх морфології внаслідок підвищеної дефектності кристалічної будови [10, 11, 12].

Структура зміцненого шару після ППЗ характеризується великою твердістю та високою дисперсністю, дає визначальний вплив на зміну експлуатаційних характеристик зміцнених матеріалів – зносостійкість, механічні властивості (міцність, пластичність, тріщиностійкість, витривалість), тепло- і корозійну стійкість.

На початку необхідно сформулювати вимоги, яким повинно задовольняти джерело нагрівання в умовах ППЗ [11]: 1 – можливість регулювання ширини нагрівання; 2 – відсутність оплавлення поверхневого шару; 3 – забезпечення рівномірної глибини структурних перетворень; 4 – досягнення необхідної мікроструктури зміцненого шару.

Спосіб ППЗ великомодульних зубчастих коліс включає нагрів без оплавлення плазмовою дугою бічної поверхні зуба із заданою силою струму. Даний спосіб пояснюється схемою (рис. 1, а). У якості джерела плазмового нагрівання обрано плазмотрон прямої дії, який складається з охолоджуваного водою корпусу 1 із соплом 2, електрода 3, каналу підведення плазмотворювального газу (повітря). Зубчасте колесо або вал-шестірня встановлюються на верстаті, генератором плазми є однодуговий плазмотрон постійного струму. Зниження локальності нагрівання плазмової дуги здійснюється шляхом накладення на потік генерованої плазми зовнішнього змінного магнітного поля. Для створення зовнішнього магнітного поля плазмотрон прямої дії 1 (ПВР-402М), що серійно випускається, оснащують спеціальною магнітною системою. Плазмотрон генерує електричну дугу, яка горить між катодом 3 і бічною поверхнею зуба колеса 5 і в місці контакту дуги з поверхнею нагріває її. У зазорі між торцями магнітопроводів 4 на дугу впливають магнітним полем, а оскільки електрична дуга являє собою провідник зі струмом, то в магнітному полі на неї діє сила Лоренца, що відхиляє дугу в площині, яка паралельна торцям магнітопроводів 4 і перпендикулярна поздовжньої лінії зубів. Змінна напруга на котушці 6 магнітної системи забезпечує коливання електричної дуги поперек поздовжньої лінії зубів. У результаті цього при скануванні плазмової дуги із частотою струму в мережі (50 Гц) пляма нагрівання ніби витягується уздовж робочої поверхні зуба 5.

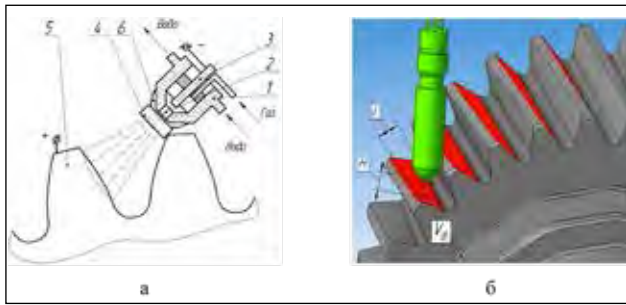


Рис. 1. Схема пристрою: а – вид в площині обробки; б – просторовий вид процесу обробки ( $H = 45...60$  мм;  $l = 35...65$  мм)

Для великомодульних зубчастих коліс розтягують пляму нагріву по всій робочій поверхні зуба, не зачіпаючи вершину та западину зуба, оскільки вони не беруть участь у зачепленні. Вплив плазмовою дугою фронтально під заданим кутом дозволяє забезпечити найбільше вкладення тепла в матеріал заготовки. При цьому амплітуда сканування плазмової дуги становить  $0,7...0,8$  висоти зуба. Даний діапазон пояснюється тим, що при нагріванні по всій висоті лівого зуба, а потім правого в зоні западини виникають перехресні нерівномірно термічно оброблені ділянки, що приводить до несприятливих термічних напруг.

Переміщення уздовж робочої поверхні зуба (рис. 1, б) плазмової дуги, що сканує, здійснюються за рахунок механізму подачі верстата зі швидкістю ( $V_d$ ), що перевищує швидкість поширення тепла в матеріалі заготовки, це забезпечує критичну швидкість зміцнення в поверхневому шарі без охолоджуючих засобів. У підсумку на робочій поверхні зуба виникає загартований шар глибиною  $4...5$  мм, твердістю HRC  $61...63$  одиниці.

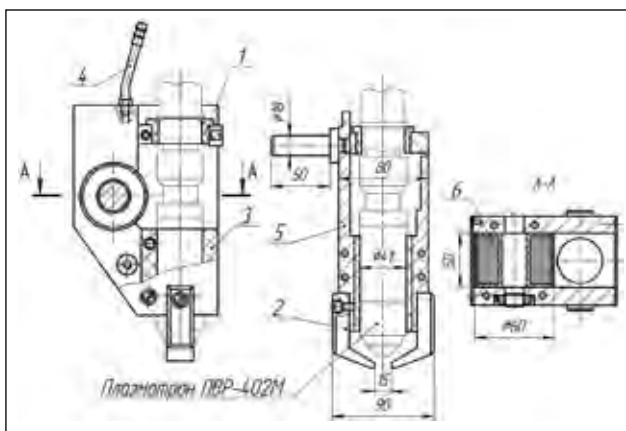


Рис. 2. Загальний вид плазмоторна з магнітно-відхиляючою системою: 1 – втулка ізолююча; 2 – наконечник; 3 – проставлення; 4 – штуцер; 5 – щока магнітопроводу; 6 – електрокотушка

Спосіб ППЗ великомодульних зубчастих передач реалізується на базі токарного верстату 1A660. У кінематичній схемі верстата був модернізований привід швидкого переміщення супорту шляхом установки перетворювача частоти фірми Delta Electronics – VFD 007 EL43A, що надало можливість змінювати швидкість лінійного переміщення плазмоторну вздовж поверхні заготовки. Маніпулятор із плазмоторном встановлюється в різцетримач. Деталь встановлюється в центрах верстата, циклічне обертання для переміщення нового зуба в зону нагрівання здійснюється вручну до упору. Для виключення оплавлення заготовки в момент запалювання плазмової дуги використовувався накладний фальш-анод, який фіксувався на торці заготовки за допомогою постійних магнітів. Установка для реалізації способу ППЗ містить: плазмову установку АПР-402; плазмоторн ПВР-402М з електромагнітним сканером (рис. 2); регульований трансформатор змінного струму для створення напруги в магнітній системі.

Загальний вид плазмоторна з магнітно-відхиляючою системою в процесі обробки великомодульної вал-шестірні ( $m = 22$ ) в умовах виробництва представлено на рис. 3.



Рис. 3. Процес обробки вал-шестірні методом ППЗ в умовах виробництва

Зроблено вибір раціональних параметрів нагрівання при ППЗ. Співвідношення розмірів джерела й величини сили струму дуги визначають значення інтенсивності:

$$q_s = \frac{I \times U \times \eta}{l_s \times b_n}, \quad (1)$$

де  $U$  – напруга в ланцюзі плазмової дуги;  $\eta$  – ККД джерела нагрівання;  $l_s$ ,  $b_n$  – розміри джерела нагрівання.

Маючи набір змінних параметрів, доцільно визначити їх раціональне співвідношення відповідно до цілей ППЗ. У якості цільової функції можна прийняти деяку максимальну температуру підігріву поверхневих шарів, що забезпечує необхідні структурні перетворення, що визначається з виразу:

$$\theta_{\max} = \frac{2q\sqrt{\omega \times \ell_s}}{\lambda \times \sqrt{\pi \times V_o}}, \quad (2)$$

де  $q$  – інтенсивність джерела;  $\lambda$ ,  $\omega$  – відповідно, коефіцієнти тепло- і температуропровідності матеріалу;  $V_o$  – швидкість переміщення джерела.

Вважаючи, що  $\theta_{\max}$  дорівнює температурі плавлення, визначимо швидкість  $V_o$ , за якої буде виконувати

$$V_o = \left( \frac{I \times U \times \eta}{\theta_m \times v_n \times \ell_s \times \lambda} \right)^2 \times \frac{\omega \times v_n}{\pi}. \quad (3)$$

Процес ППЗ має ряд специфічних особливостей, внаслідок яких існують обмеження, що накладаються на параметри процесу нагрівання.

На рис. 4 показано зразок зі сталі 40X, поверхня якого піддавалась плазовому нагріву. На торцевій поверхні макрощліфу спостерігається в вигляді рівномірної світлої смуги шар, що є відмінним за травимістю від основного металу.



Рис. 4. Зразок, який був підданий нагріву плазовою дугою, що сканує

Аналіз структурно-фазових перетворень показав, що деталі, піддані ППЗ, мають високу поверхневу твердість та пластичність, що є важливими експлуатаційними показниками, які впливають на працездатність зубчастого зачеплення. З'ясовано, що за ППЗ сталі 40X у всьому діапазоні швидкості відносного переміщення деталі й плазмотрона (100..630 мм/хв), за яких проводилися дослідження, утворюється мартенситний шар різної глибини, що відрізняється від основної структури (рис. 5). У результаті утворюється досить складна структура металу, що складається з верхнього й нижнього бейніту, мартенситу й залишкового аустеніту [13].

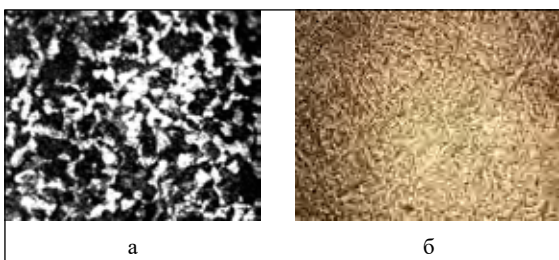


Рис. 5. Изменение структуры материала под влиянием плазменного нагрева (а – початкова структура; б – структура після ППЗ)

Наведені дані показують, що плазовий підігрів матеріалу припуску в умовах ППЗ може істотно змінити стан його структури, що може привести до значної зміни властивостей матеріалу в вигідну сторону. З метою вивчення властивостей середньолегованих сталей (40X) у процесі охолодження був зроблений вимір динамічної твердості (рис. 6). В процесі остигання відбувається зміцнення поверхневих шарів заготовки, нагрітих вище температури  $A_{c3}$ , причому різке збільшення твердості починається за умови охолодження до температури 200...230°C.

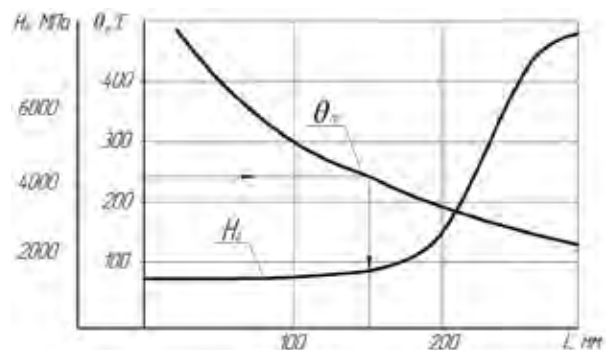


Рис. 6. Зміна температури й динамічної твердості в процесі охолодження після плазового нагрівання (сталь 40X;  $I = 250$  А,  $V_o = 300$  мм/хв;  $d_c = 6$  мм;  $Q_{\text{нов}} = 2,5$  м<sup>3</sup>/год)

Результати виміру мікротвердості представлені на (рис. 7). Із представлених графіків видно, що мікротвердість поверхневих шарів заготовки, обробленої на різних теплових режимах, на глибині 3...5 мм значно відрізняється за величиною від мікротвердості вихідної структури матеріалу.

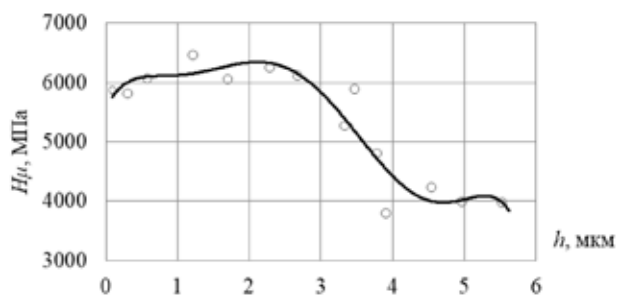


Рис. 7. Зміна мікротвердості поверхні після ППЗ

Проведені випробування (прискореним методом) показали, що ППЗ легованих сталей (40X) приводить до підвищення його абразивної зносостійкості в 2,28 рази, що можна пояснити структурою зміцнення, утворенням мартенситу та підвищенням твердості. На рис. 8 наведені криві зношування зубчастих передач, яке оцінювалося

за зміною товщини зуба по ділильній окружності до випробування та після певного часу роботи.

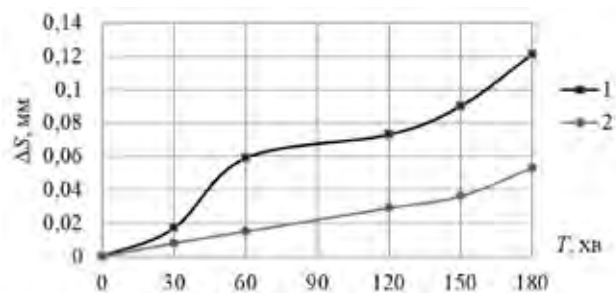


Рис. 8. Інтенсивність абразивного зношування зубчастих коліс: 1 – зношування незагартованого зубчастого колеса; 2 – зношування зубчастого колеса, підданого ППЗ

Дослідженнями встановлено, що поверхнева обробка плазмовим струменем із застосуванням сканованої магнітної системи є ефективним методом поверхневого зміцнення зубчастих коліс і забезпечує більш високі значення твердості й зносостійкості.

**Висновки.** В умовах ППЗ ефективність плазмової дуги як джерела нагрівання суттєво залежить від

співвідношення розмірів теплового джерела, його швидкості й теплової потужності; раціональним слід уважати таке їх співвідношення, за якого температура поверхні, що нагрівається, досягає, але не перевищує температури плавлення для даного матеріалу. Розроблено спосіб термічної обробки великомодульних зубчастих коліс, що включає нагрів бічної поверхні зуба без оплавлення плазмовою дугою, при цьому переміщення дуги проводять поступально від одного торця зубчастого колеса до іншого зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення температури в даному матеріалі.

Експериментально встановлена закономірність формування загартованого шару під час ППЗ. Показано, що під час швидкісного нагрівання без оплавлення сканованою плазмовою дугою швидкість охолодження поверхневих шарів досягає швидкості гартування. Це забезпечує структурні перетворення в металі, формує зміцнений поверхневий робочий шар та забезпечує високі експлуатаційні характеристики поверхневого робочого шару: зносостійкість зубчастих передач підвищується в 2,28 рази.

#### Список літератури:

1. Карагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. Москва : Машиностроение, 1977. 526с.
2. Натаров А.П. Исследование влияния геометрических параметров зубчатых передач, работающих в средах с наличием абразива на их долговечность: автореф. дис. ... канд. техн. наук.:05.02.04. Харьков, 1978. 28 с.
3. Ямпольский Г.Я., Крагельский И.В. Исследование абразивного износа элементов пар трения качения. Москва : Наука, 1973. 63 с.
4. Antoni Skoc, Jacek Spalek. Kontemporary directions and methods of studying bevel gears working in mining machines drives. Acta Montanistica Slovaca. 2002. Vol. 3. P. 205–207
5. Harris, T., W. Yu. Lundberg-Palmgren Fatigue Theory: Considerations of Failure Stress and Stressed Volume. Transactions ASME Journal of Tribology. 1999. Vol. 121. P. 85–89.
6. Ryazantsev A.A. Analysis of means of reliability and service life growth for open gear drive of ore-pulverizing mills. Metallurgical and Mining Industry. 2014. № 4. P.16–22. URL: <http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/4.2014.pdf>.
7. Rolf Roggen. Durcissement Super ficial par Plasma des aciers au carbone des fonts. Rev. Metallurgie. 1979. №7. P. 532–537.
8. Самогугин С.С., Пуйко А.В., Соляник Н.Х. Эксплуатационные свойства инструментальных сталей после комплексного объемно-поверхностного упрочнения. Металловедение и термическая обработка металлов. 1997. №5. С. 2–6.
9. Домбровский Ю.М., Бровер А.В. Обработка стали воздушно-плазменной дугой со сканированием. Металловедение и термическая обработка металлов. 1999. № 1. С. 10–13.
10. Резников Н.А., Шатерин М.А., Кунин В.С., Резников Л.А. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом. Москва : Машиностроение, 1986. 232 с.
11. Нечаев В.П., Рязанцев А.А. Особенности тепловых процессов при обработке заготовок с плазменным нагревом. Вісник Криворізького технічного університету. 2010. Вип. 26. С. 157–160.
12. Домбровский Ю.М. Технологический комплекс для изучения плазменного нагрева. Применение новых материалов в машиностроении : межвуз. сб. научн. тр. ДГТУ. Ростов-на-Дону, 1997. С. 104–107.
13. Богомоллова Н.А. Практическая металлография. Москва : Высшая школа, 1978. 272 с.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ НАГРУЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ

*Статья посвящена повышению износостойкости крупномодульных зубчатых передач за счет применения инновационного метода поверхностного плазменного упрочнения (ППУ) рабочих поверхностей зубьев. Экспериментально исследован процесс ППУ, выполнена оценка полученных физико-механических свойств и твердости обрабатываемого материала при плазменном нагреве. Проведены расчеты на долговечность по параметру износа. Установлено, что применение данного способа термической обработки повышает износостойкость в 2,28 раза. Разработан и создан комплекс специализированного оборудования для реализации технологической схемы ППУ зубчатых передач без оплавления.*

**Ключевые слова:** абразивное изнашивание, поверхностное плазменное упрочнение, структурно-фазовые превращения, концентрированный источник нагрева.

## TECHNOLOGY OF PLASMA CASE-HARDENING OF LOADED SUPPORT SURFACE DETAILS

*The article is devoted to the increase of wear resistance of large-modular gears due to the application of the innovative method of plasma case-hardening (PCH) working surfaces of teeth. The process of PCH has been experimentally investigated, an estimation of the obtained physical and mechanical properties and hardness of the processed material during plasma heating has been made. The process of PCH has been experimentally investigated, an estimation of the obtained physical and mechanical properties and hardness of the processed material during plasma heating has been made. The calculations on durability have been performed for the wear parameter; and it has been established that the application of this heat treatment method increases the durability 2.28 times. A complex of specialized equipment was developed for the implementation of the technology system of PCH of the gears' working surfaces without melting.*

**Ключові слова:** abrasive wear; plasma case-hardening, structural-phase transformations, concentrated heating sources.

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 620.178.1:631.313.02

**Борак К.В.**

Житомирський агротехнічний коледж

### ЗМІНА ПОВЕРХНЕВОЇ ТВЕРДОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ДИСКОВИХ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*У роботі встановлено закономірності зміни поверхневої твердості робочих органів дискових ґрунтообробних машин, виготовлених зі сталі 65Г та 28MnB5. У результаті взаємодії робочих органів дискових ґрунтообробних машин із ґрунтовим середовищем твердість поверхні суттєво змінюється. На різних типах ґрунтів та для різних матеріалів закономірність зміни твердості носить відмінний характер.*

**Ключові слова:** твердість, робочі органи, сталь, ґрунт, поверхня.

**Постановка проблеми.** На початок 2018 р. в Україні налічувалося понад 370 тис. ґрунтообробних машин (табл. 1). Протягом останніх років спостерігається ріст кількості даних машин у сільськогосподарських виробників (табл. 1). Машинобудівна галузь України повною мірою спроможна забезпечити виробництво ґрунтообробних машин для агропромислового комплексу України. За даними сайту Державної фіскальної служби [1], за останні три роки спостерігається зменшення імпорту ґрунтообробної техніки та збільшення її експорту (основні країни-експортери – Російська Федерація, Молдова, Німеччина, Казахстан).

Лідерами з виробництва ґрунтообробних та посівних машин в Україні є такі компанії, як: ПАТ «Ельворті», ТОВ «Завод «Оптікон», ВАТ «Лозівський ковальсько-механічний завод», ВАТ «Велес-Агро ЛТД», ТОВ «НВП «Білоцерків-МАЗ», ВАТ «Галещина, машзавод», ВАТ «Умань-ферммаш», ВАТ «Хмільниксільмаш», Корпорація «Агро-Союз», ВАТ «ВО «ВОСХОД», ВАТ «Завод «Фрегат», ТОВ «АК «Фаворит» та ін.

Незважаючи на такі позитивні дані статистики, слід відзначити, що більшість підприємств закуповує робочі органи, які взаємодіють із ґрунтовим середовищем, за кордоном або закуповує за кордоном матеріал для їх виготовлення (здебільшого боровмістку сталь). Деякі підприємства виготовляють робочі органи зі сталі вітчизняного виробництва. Найбільше для цих потреб використовують сталь 65Г.

Для вибору оптимального матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин та його властивостей необхідно знати процеси, що відбуваються на поверхні в результаті взаємодії з ґрунтом. Це дає змогу досягати «позитивної самоорганізації» поверхні, яка взаємодіє з ґрунтом, що, своєю чергою,

призведе до можливості суттєво підвищити зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.

Таблиця 1

**Наявність сільськогосподарської техніки в сільськогосподарських підприємствах на кінець 2017 р. [2]**

Найменування	Усього	У % до наявності на початок року
Плуги	49072	103,4
Культиватори	70100	102,0
Борони	181386	98,7
у т. ч. дискові	31707	106,5

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідженням зміни властивостей поверхневих шарів за абразивного зношування займалися М.М. Хрушов [3; 4], Б.І. Костецький [5], М.М. Северньов [6], В.Н. Ткачов [7; 8], М.М. Тененбаум [9] та ін. Усі дослідники дійшли висновку, що в результаті зношування на поверхні утворюється шар, який за своїми фізико-механічними властивостями відрізняється від матеріалу основи. Цей шар може мати як більшу, так і меншу зносостійкість порівняно з матеріалом основи.

Незважаючи на велику кількість праць із вивчення фізико-механічних властивостей поверхневих шарів за абразивного зношування, багато питань залишаються не розкритим, оскільки переважна більшість досліджень зміни фізико-механічних властивостей поверхневих шарів проводилася



за зношування закріпленим абразивом. Результати даних досліджень не описують закономірності зміни фізико-механічних властивостей поверхневих шарів за зношування незакріпленим абразивом та абразивом, який знаходиться в «напівзакріпленому» стані.

**Постановка завдання.** Мета роботи – дослідити закономірності зміни поверхневої твердості робочих органів дискових ґрунтообробних машин за зношування на різних ґрунтах та дати рекомендації щодо застосування матеріалів для виготовлення робочих органів для різних типів ґрунтів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для визначення впливу ґрунтового середовища на зміну поверхневої твердості дослідження проводили на трьох типах ґрунтів: супіщаному, середньому суглинку та глині легкій.

Результати вимірювання проводили за схемою, представленою на рис. 1. Кількість замірів у кожній зоні становила  $n=10$ . Ширина зон дорівнювала 10 мм. Для достовірності отриманої інформації вимірювання проводили на шести робочих органах.

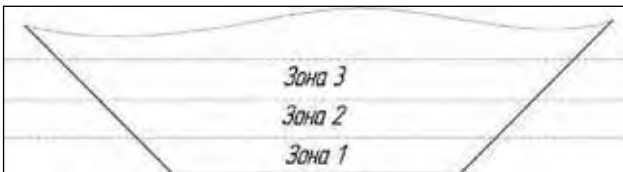


Рис. 1. Схема проведення замірів твердості на зовнішній поверхні диска (ширина зон – 10 мм)

Вимірювання твердості проводилися відповідно до ASTM A1038. Даний метод найбільше підходить для контролю твердості зміцнених поверхневих шарів, оскільки глибина проникнення індектора зазвичай знаходиться в межах 30–50 мкм.

Твердість поверхні визначали за допомогою портативного твердоміра Т-УД2 (рис. 2), заводський номер 008.119.12.16, дата виготовлення – 13.12.2016. Перевірка твердоміра проходила в ДП «Дніпропетровський регіональний державний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації», свідоцтво №10-0/6926/1 від 12.01.2017.

Дослідження зміни отвердості робочих органів дискових борін проводили на агрегатах:

- БДВП-4,2, виробник – ТОВ «Краснянське СП «Агромаш», в умовах Козятинського району Вінницької області;

- БДВП-7,2, виробник – ТОВ «Краснянське СП «Агромаш», в умовах Коростенському районі Житомирської області;

- БПД-4,2, виробник – ПАО «Завод «Фрегат», в умовах Овруцького району Житомирської області.



Рис. 2. Твердомір Т-УД2

Результати досліджень представлено в табл. 2.

Як видно з табл. 2, твердість нових вітчизняних дисків, виготовлених зі сталі 65Г, коливається в межах 35,91...40,89 HRC, а твердість дисків фірми Bellota, виготовлених зі сталі 28MnB5 – 48,75...50,69 HRC. У процесі експлуатації робочих органів дискових ґрунтообробних машин твердість поверхні суттєво змінюється. На різних типах ґрунтів закономірність зміни твердості носить відмінний характер (рис. 3 та 4).

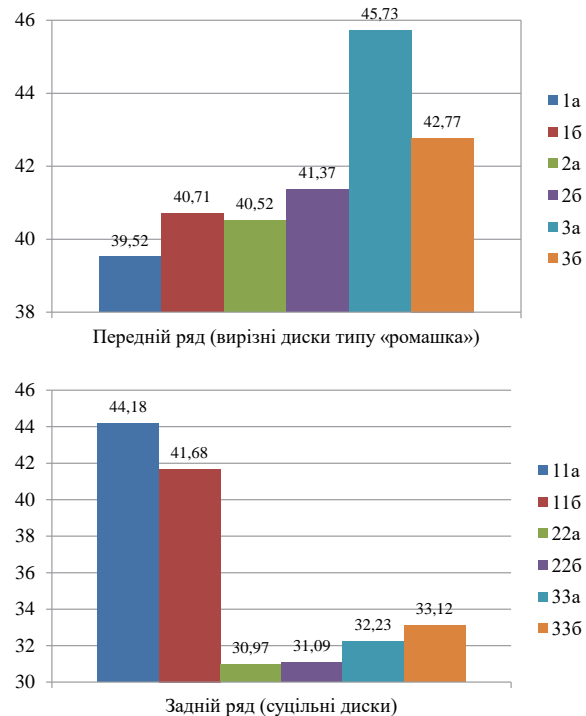


Рис. 3. Зміна твердості поверхні дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г: 1а, 11а, та 16, 116 – зовнішня та внутрішня сторона диска відповідно експлуатуються на легкій глині; 2а, 22а та 26, 226 – зовнішня та внутрішня сторона диска відповідно експлуатуються на середньому суглинку; 3а, 33а та 36, 336 – зовнішня та внутрішня сторона диска відповідно експлуатуються на супіщаному ґрунті

**Зміна мікротвердості внутрішньої поверхні робочих органів дискової борони БДВП-4,2, виробник – ТОВ «Краснянське СП «Агромаш» (вимірювання проводилися в зоні 1, рис. 1)**

Грунт	Матеріал	Тип робочого органу	Сторона проведення заміру	Твердіть робочої поверхні елемента трибосистеми «робочий орган – ґрунт», $\bar{\sigma}$ (HRC)	
				Початкова	Після напрацювання*
глина легка	Сталь 65Г	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішня	37,29	39,52
			Внутрішня	37,63	40,71
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішня	36,83	44,18
			Внутрішня	37,06	41,68
	28MnB5	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішня	50,44	54,96
			Внутрішня	49,82	54,41
Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішня	49,65	56,37		
	Внутрішня	50,38	58,04		
середній суглинок	Сталь 65Г	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішня	36,80	40,52
			Внутрішня	37,12	41,37
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішня	36,87	30,97
			Внутрішня	35,91	31,09
	28MnB5	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішня	50,05	54,41
			Внутрішня	49,19	53,29
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішня	49,08	57,5
			Внутрішня	49,94	54,59
супіщаний	Сталь 65Г	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішня	39,87	45,73
			Внутрішня	40,27	42,77
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішня	39,75	32,23
			Внутрішня	40,89	33,12
	28MnB5	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішня	50,36	37,23
			Внутрішня	49,62	36,38
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішня	48,75	39,34
			Внутрішня	50,69	41,04

\* БДВП-4,2 в умовах Козятинського району Вінницької області напрацювала 1 200 га; БДВП-7,2 в умовах Коростенського району Житомирської області напрацювала 1 950 га; БД-4,2 в умовах Овруцького району Житомирської області напрацювала 840 га.

Із представлених результатів дослідження можна зробити висновок, що твердість поверхні вирізних сферичних дисків, виготовлених зі сталі 65Г, які працюють у першому ряду, підвищується. Це явище можна пояснити явищем «наклепу» робочої поверхні, адже дані диски працюють у напівзакріпленому абразивному середовищі. Найбільше твердість поверхні підвищується у дисків, які працюють на супіщаному ґрунті.

Для суцільних дисків (задній ряд), які працюють у незакріпленій абразивній масі, для всіх типів ґрунтів, окрім легкої глини, спостерігався процес зменшення поверхневої твердості робочої поверхні.

У задніх дисків не спостерігається процес зміцнення поверхні в результаті взаємодії з абразивними частинками, оскільки вони в переважній більшості взаємодіють із вільними абразивними частинками.

Для переднього і заднього рядів дискових робочих органів ґрунтообробних машин, виготовлених зі сталі 28MnB5, спостерігається підвищення поверхневої твердості на 3–7 одиниць HRC на глинистих та суглинкових ґрунтах. На супіщаному ґрунті спостерігається процес зменшення поверхневої твердості на 11–14 одиниць HRC.

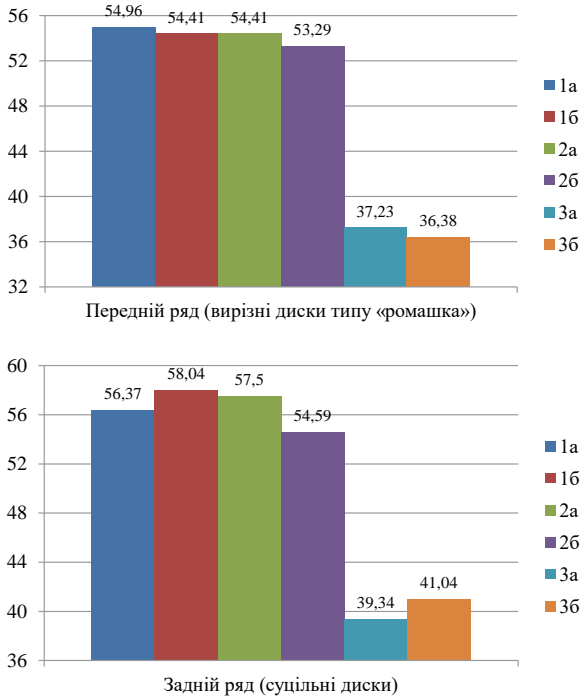
Для більш детального аналізу зміни поверхневої твердості в робочих органах ґрунтообробних машин було проведено дослідження зношених дисків за схемою, представленою на рис. 5.

Таблиця 3

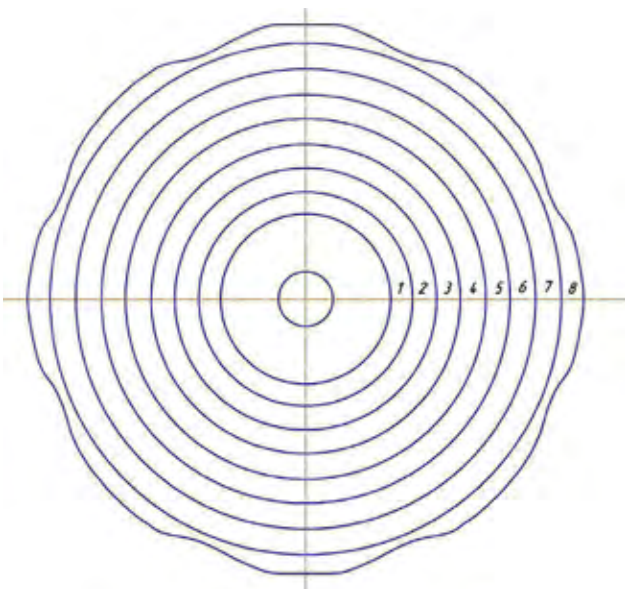
**Поверхнева твердість зношеного дискового робочого органу, що працював на глинистих ґрунтах у передньому ряду, виготовленого зі сталі 28MnB5 (внутрішня поверхня)**

Зона	Середня твердість HRC
1	46,68
2	47,74
3	46,59
4	58,16
5	57,75
6	62,06
7	63,67
8	40,75

З табл. 3 видно, що в зонах 1, 2 та 3, де відсутнє інтенсивне абразивне зношування, не спостерігається зміни поверхневої твердості. У зонах 4, 5, 6 та 7, де протікає процес абразивного зношування, спостерігається суттєве підвищення поверхневої твердості за рахунок самоорганізації поверхневих шарів. У зоні 8 спостерігається зменшення поверхневої твердості, що пояснюється складнішими умовами протікання процесу абразивного зношування та зміною його механізму. Підтвердження даного твердження можна спостерігати візуально на рис. 6. Дана закономірність зміни поверхневої твердості по площі диску справедлива для робочих органів, виготовлених зі сталі 65Г та 28MnB5 на всіх типах ґрунтів.



**Рис. 4. Зміна твердості поверхні дискового робочого органу, виготовленого зі сталі 28MnB5: 1а, 11а, та 16, 116 – зовнішня та внутрішня сторона диска відповідно експлуатуються на легкій глині; 2а, 22а та 26, 226 – зовнішня та внутрішня сторона диска відповідно експлуатуються на середньому суглинку; 3а, 33а та 36, 336 – зовнішня та внутрішня сторона диска відповідно експлуатуються на суцільному ґрунті**



**Рис. 5. Схема проведення замірів поверхневої твердості на зношеному робочому органі**

Результати досліджень поверхневої твердості зношеного дискового робочого органу, що працював на глинистих ґрунтах, виготовленого зі сталі 28MnB5, представлено в табл. 3.



**Рис. 6. Загальний вигляд робочої поверхні дискової борони БДВП-7,2 (перший ряд, матеріал робочого органу – сталь 28MnB5)**

**Висновки.** Для підвищення довговічності дискових робочих органів ґрунтообробних машин (ураховуючи, що з підвищенням твердості металу інтенсивність абразивного зношування зменшується) необхідно: на глинистих і суглинкових ґрунтах використовувати диски, виготовлені зі сталі 28MnB5, а на піщаних та суцільних – зі сталі 65Г.

**Список літератури:**

1. Державна фіскальна служба України. Зовнішня торгівля України із зазначенням основних країн-контрагентів. URL: <http://sfs.gov.ua/ms/f3> (дата звернення: 24.03.2019).
2. Сільське господарство України: статистичний збірник. Київ : Державна служба статистики України, 2017. 245 с.
3. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. Москва : Наука, 1970. 252 с.
4. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследования изнашивания металлов. Москва : АН СССР, 1960. 272 с.
5. Костецкий Б.И. Сопrotивление изнашиванию деталей машин. Москва ; Киев : МАШГИЗ, 1959. 478 с.
6. Износ и коррозия сельськохозяйственных машин / М.М. Севернев и др. ; под. ред. М.М. Севернева. Минск : Беларус. навука, 2011. 333 с.
7. Ткачев В.Н. Работоспособность деталей в условиях абразивного изнашивания. Москва : Машиностроение, 1995. 336 с.
8. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин. Москва : Машиностроение, 1966. 332 с.
9. Тененбаум М.М. Сопrotивление абразивному изнашиванию. Москва : Машиностроение, 1976. 271 с.

**ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТВЕРДОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
ДИСКОВЫХ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*В работе установлены закономерности изменения поверхностной твердости рабочих органов дисковых почвообрабатывающих машин, изготовленных из стали 65Г и 28MnB5. В результате взаимодействия рабочих органов дисковых почвообрабатывающих машин с почвой твердость поверхности существенно меняется. На разных типах почв и для различных материалов закономерность изменения твердости носит отличный характер.*

**Ключевые слова:** твердость, рабочие органы, сталь, почва, поверхность.

**CHANGE IN SURFACE HARDNESS OF DISC WORKING BODIES  
OF TILLAGE MACHINES IN THE OPERATION PROCESS**

*In the work regularities of the change in the surface hardness of the working bodies of disc soil tillage machines made of steel 65Г and 28MnB5 were established. As a result of the interaction of the working bodies of disk tillage machines with the soil, the surface hardness varies significantly. For different types of soils and for different materials, the pattern of hardness variation is excellent.*

**Key words:** hardness, working bodies, steel, soil, surface.

# АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 629.7.03:681.5.03 (045)

**Єнчев С.В.**

Національний авіаційний університет

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ НЕЧІТКОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВІАЦІЙНИМИ ДВИГУНАМИ

*Статтю присвячено питанню забезпечення відмовостійкості систем керування авіаційними двигунами. Система керування уявляється як складна логіко-динамічна системи, яка дає змогу продовжувати дії, задані програмою, після виникнення відмов. Для забезпечення відмовостійкості у разі відмови електронної керувальної частини передбачено перехід на резервні гідромеханічні системи. Застосування відмовостійкої інтелектуальної системи керування авіаційними двигунами на основі нечіткої логіки дає змогу забезпечити локалізацію відмови та її парирування та зберегти при цьому необхідну якість процесів керування. Розроблено нечітку відмовостійку систему керування одновального авіаційного двигуна за каналом швидкості обертання вільної турбіни та досліджено його роботу за відмови одного з датчиків.*

**Ключові слова:** авіаційний двигун, інтелектуальна система керування, нечітка логіка, відмовостійкість, адаптація.

**Постановка проблеми.** Однією з головних характеристик систем керування авіаційними двигунами (АД) є надійність. Підвищення надійності базується на принципі запобігання несправностям шляхом зниження інтенсивності відмов та збоїв елементів системи автоматичного керування (САК), застосування електронних схем і компонентів із поліпшеними ймовірнісними характеристиками, використання полегшених режимів роботи схем. Відмовостійкість – це така властивість САК як складної логіко-динамічної системи, яка дає змогу продовжувати дії, задані програмою, після виникнення відмов; комплексний показник надійності функціональної системи (ФС), визначуваний імовірністю того, що система функціонуватиме на певному рівні якості після того, як відбудеться відмова (або декілька відмов) у компонентах її апаратури і (або) їхнього програмного забезпечення [контролю та діагностування стану ІСК АД;

– відновлення працездатності ІСК під час виникнення відмов АД або керувальної частини САК.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Важливим напрямом забезпечення відмовостійкості САК АД є вдосконалення їхньої архітектури на основі базової концепції (Full Authority Digital Engine Control), яка базується на побудові цифрової САК АД із повною відповідальністю.

Сучасні бортові САК АД типу FADEC поєднують функції керування АД, а також функції контролю технічного стану, діагностики відмов елементів САК та їх парирування. Поряд із традиційними завданнями ІСК АД повинні вирішувати додаткові завдання, пов'язані з прийняттям оперативних рішень на основі накопичених знань в умовах невизначеності та адаптації (тобто зміни своєї структури і параметрів) у разі виникнення можливих нештатних ситуацій. Таким чином, сформуємо завдання дослідження – розроблення відмовостійкої ІСК АД на основі інтелектуальних технологій – нечіткої логіки.

**Принципи забезпечення відмовостійкості САК АД.** Для забезпечення відмовостійкості цифрових САК на практиці використовують три способи введення резерву [5, с. 139]:

- структурний;
- програмний;
- часовий.

Загалом відмовостійкість САК АД забезпечується виконанням трьох дій: виявлення відмови, її діагностування та відновлення. Здебільшого відмовостійкість забезпечується шляхом використання методів приховання несправностей, для яких у явному вигляді відсутні операції виявлення та діагностування.

Засоби діагностування цифрових САК АД базуються на використанні таких методів автоматичного контролю [6, с. 3.35]:

1. Контроль парності оперативної пам'яті, контроль парності у разі введення/виведення інформації, а також за безпосереднього звертання до пам'яті.

2. Захист за допомогою спеціальних лічильників-таймерів від зацикловань або неправильного ходу виконання програм, які викликані порушенням коду команд.

3. Контроль вихідної напруги блоку живлення.

4. Захист пам'яті на випадок одночасного звертання до неї декількох програм.

5. Захист від неправильної адресації у разі звертання до оперативної пам'яті.

Для забезпечення відмовостійкості САК АД у разі відмови електронної керувальної частини передбачено перехід на резервні гідромеханічні системи, які забезпечують реалізацію спрощених алгоритмів керування керування [1, с. 121].

Для підвищення надійності електронної керувальної частини можуть бути використані такі методи, як мажоритарне резервування, дублювання (або потрійне резервування) окремих модулів і порівняння результатів обчислень програмним шляхом або за допомогою спеціальної апаратури.

Використання ІСК АД дає змогу при цьому забезпечити властивості робастності, адаптивності та відмовостійкості процесів керування АД в умовах дії суттєвих чинників невизначеності [4, с.12]. Для забезпечення надійності та відмовостійкості ІСК АД необхідне вирішення таких завдань: контролю та діагностування ІСК АД; відновлення працездатного стану ІСК за виникнення відмов АД або керувальної частини САК.

Нині під час створення САК АД відмовостійкість забезпечується за рахунок уведення резервування на основі методології FADEC. Перевагою даного підходу є досягнення високого рівня безвідмовності за рахунок резервування і перехресних зв'язків. Головний недолік – екстенсивний підхід до вирішення проблеми надійності.

Застосування сучасних інтелектуальних технологій передбачає використання експертних знань або знань, накопичених ІСК, для виявлення відмови і парирування його за рахунок реконфігурації або адаптації.

Розглянемо підхід до забезпечення надійності та відмовостійкості ІСК АД, який базується на парадигмі навчання, адаптації до внутрішніх і зовнішніх чинників; реконфігурацій каналів керування (характері взаємодії локальних регуляторів) на основі принципу мінімальної складності. Послідовність етапів синтезу відмовостійкої САК АД наведена на рис. 1.



Рис. 1. Етапи синтезу відмовостійкої САК АД

**Синтез відмовостійкої нечіткої системи керування авіаційним АД.** Системи автоматичного керування АД із нечіткими регуляторами можна віднести до класу динамічних експертних систем [4, с. 11] поруч з алгоритмами керування, які використовуються за нормальних умов польоту ПС. База знань нечіткої ІСК авіаційним АД повинна містити в собі алгоритми розпізнавання нештатних ситуацій у польоті та правила прийняття рішень у цих ситуаціях. Згідно з [1, с. 58], розрізняють такі нормовані за НТД вимоги до можливих проявів особливих польотних ситуацій:

- ускладнення умов польоту (УУП);
- складна ситуація (СС);
- аварійна ситуація (АС);
- катастрофічна ситуація (КС).

У разі виявлення відмови одного з елементів САК АД база знань дає змогу вибрати одне з можливих альтернативних рішень для досягнення поставленого завдання керування ІСК авіаційним АД за рахунок наявних структурних, функціональних, програмних, навантажувальних видів резервування без або з частковою втратою якості керування. До цих рішень слід віднести [5, с. 140]:

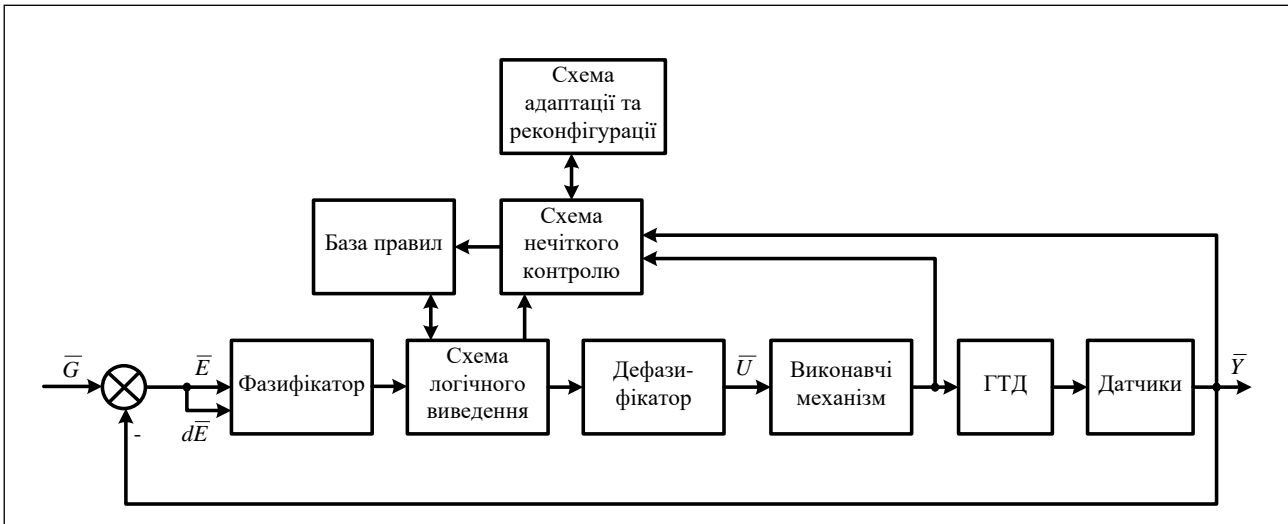


Рис. 2. Структурна схема нечіткої відмовостійкої САК АД

– зміну структури та параметрів алгоритмів керування на основі інформації про поведінку САК в особливих ситуаціях у польоті;

– спрощення алгоритмів обчислення керувального впливу, наприклад шляхом застосування більш простої бази правил;

– зміну точності обчислень керувальних впливів, що дає змогу вивільнити час для процесора САК АД, яке необхідне для парювання відмови алгоритмічними методами;

– скорочення списку виконуваних польотних завдань, перехід на резервні програми керування АД;

– використання структурної надлишковості: підключення резервних датчиків, виконавчих механізмів, інших елементів САК АД;

– оповіщення пілота про виникнення нештатної ситуації та видача рекомендації з їх усунення.

На рис. 2 наведено структурну схему нечіткої відмовостійкої САК АД, де  $\bar{G}$  – вектор задавальних впливів;  $\bar{Y}$  – вектор вимірюваних параметрів АД;  $\bar{U}$  – вектор керувальних впливів;  $\bar{E}$  – вектор похибок керування;  $d\bar{E}$  – вектор похідних похибок керування.

Вектор керувальних впливів  $\bar{U}$  формується за такими етапами [3, с. 12]:

1. Визначення відхилень вектора похибок керування  $\bar{E}$  та вектора похідних похибок керування  $d\bar{E}$ .

2. Фазифікація даних векторів  $\bar{E}$  та  $d\bar{E}$ , тобто перетворення отриманих значень до нечіткого вигляду, у формі лінгвістичних змінних.

3. Визначення нечітких (якісних) значень вектора керувальних впливів  $\bar{U}$  або його приросту  $d\bar{U}$  у вигляді функцій приналежності відпо-

відним нечітким підмножинам на основі раніше сформульованих правил логічного виводу, записаних у базі правил (знань).

4. Дефазифікація – обчислення реальних числових значень вектора  $\bar{U}$ , які використовуються як керувальні впливи АД.

На рис. 3 наведено один із можливих виглядів таблиці рішень для двох змінних  $X_k$  і  $X_n$ , що являє собою набір нечітких правил «ЯКЩО – ТО» для  $i$ -го каналу керування САК АД.

		$X_n$										
		VLN	LN	MN	SN	Z	SP	MP	LP	VLP		
$X_k$	VLN	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Область нормального функціонування	
	LN	■	■	■	■	■	■	■	■	■		Область передвідмовного стану
	MN	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	SN	■	■	■	■	■	■	■	■	■		Область відмов
	Z	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
	SP	■	■	■	■	■	■	■	■	■		Область невизначеності
	MP	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
LP	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
VLP	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		

Рис. 3. Розширена таблиця рішень нечіткої САК АД

Змінні  $X_k$  і  $X_n$  можуть приймати множину якісних значень:

$$S = \{Z, SP, MP, LP, VLP, SN, MN, LN, VLN\},$$

де  $Z$  – «нуль»;  $SP$  – «мале додатне»;  $MP$  – «середнє додатне»;  $LP$  – «велике додатне»;  $VLP$  – «дуже велике додатне»;  $SN$  – «мале від'ємне»;  $MN$  – «середнє від'ємне»;  $LN$  – «велике від'ємне»;  $VLN$  – «дуже велике від'ємне».

Клітини розширеної таблиці значень заповнюються на основі правил прецедентів, експертних

оцінок, які містяться в базі знань. На основі експертних оцінок або експериментальним шляхом визначаються допустимий діапазон зміни змінних  $X_k$  і  $X_n$ , САК АД і правила поведінки (прийняття рішень) у штатних та особливих ситуаціях у польоті. Відмова у цьому разі визначається з якісними значеннями (термами) сигналів похибок та їхніх похідних. Якщо вказані якісні значення приймають непередбачені комбінації, то така ситуація визнається особливою й видається сигнал відмови [6, с. 3.35].

Розглянемо приклад синтезу відмовостійкої нечіткої ІСК авіаційного одновального АД із вільною турбіною (рис. 4). На рис. 4 використані позначення: К – компресор; Т – турбіна; ГГ – газогенератор; ВТ – вільна турбіна; КЗ – камера згоряння;  $G_T$  – витрата палива в камеру згоряння;  $W$  – потужність, що відбирається на валу вільної турбіни.

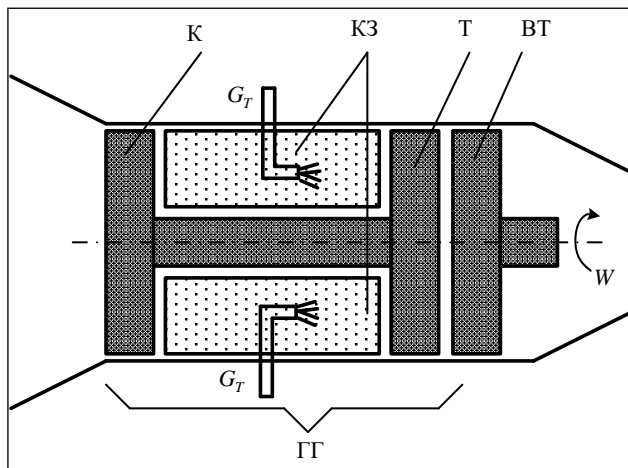


Рис. 4. Кінематична схема одновального АД із вільною турбіною

Уважаємо, що під час вибору алгоритмів керування САК АД необхідно виконати такі вимоги [3, с. 8]:

- у разі зміни корисного навантаження на вільній турбіні в діапазоні від 10% до 100% необхідно забезпечувати задану швидкість обертання ротора вільної турбіни ( $n_{BT} = const$ );

- у разі відмови одного з датчиків швидкостей обертання компресора  $n_K$  та вільної турбіни  $n_{BT}$  необхідно зберегти працездатність САК АД шляхом зміни конфігурації системи керування.

На рис. 5 наведено структурну схему нечіткої відмовостійкої ІСК одновального авіаційного АД за каналом швидкості обертання вільної турбіни, де  $W_1(p)$  та  $W_2(p)$  – лінійні пропорційно-інтегральні регулятори; НР – нечіткий регулятор;  $n_{BTO}$  – задана частота обертання ротора вільної турбіни;  $n_K$  – частота обертання компресора;  $n_{BT}$  – частота обертання ротора вільної турбіни; ПН – паливний насос.

Інтелектуальний регулятор САК АД складається з нечіткого регулятора (супервізора), який має розширену таблицю рішень (базу знань). Таблиця рішень оновлюється на рівні інтелектуальної САК АД на основі алгоритмів Data Mining: неперервні дані дефазифікуються, а далі на основі алгоритмів формування знань формується дерево правил. Застосування такого підходу забезпечує необхідну якість перехідних процесів у широкому діапазоні роботи АД:  $0 \leq H \leq 5200$  м;  $0 \leq M \leq 0,4$ , а також забезпечити реконфігурацію САК АД у разі відмови одного датчика.

У процесі функціонування САК АД похибка керування  $\Delta n_{BT}$  та її похідна  $\Delta \dot{n}_{BT}$  аналізуються за допомогою нечітких правил, і в разі їх нерозрахункових значень формується сигнал відмови.

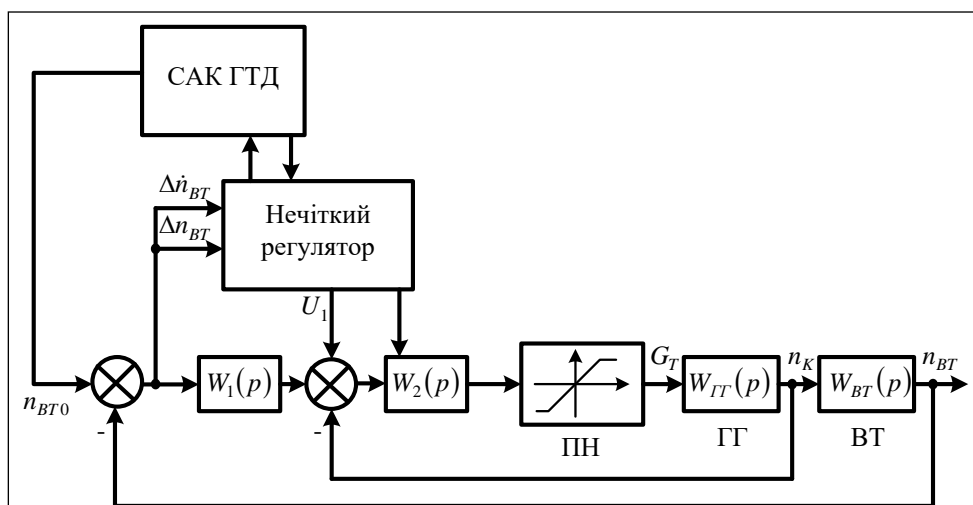


Рис. 5. Структурна схема нечіткої відмовостійкої ІСК одновального авіаційного АД за каналом швидкості обертання вільної турбіни



На основі проведеного аналізу сигналів на виході нечіткого регулятора та сигналів із датчиків  $n_K$  і  $n_{BT}$  приймається рішення про зміну параметрів другого ПІ-регулятора.

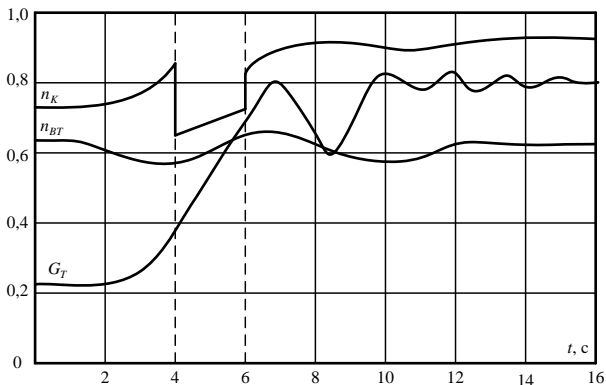


Рис. 6. Результати моделювання САК АД за відмови датчика  $n_K$  без нечіткого регулятора

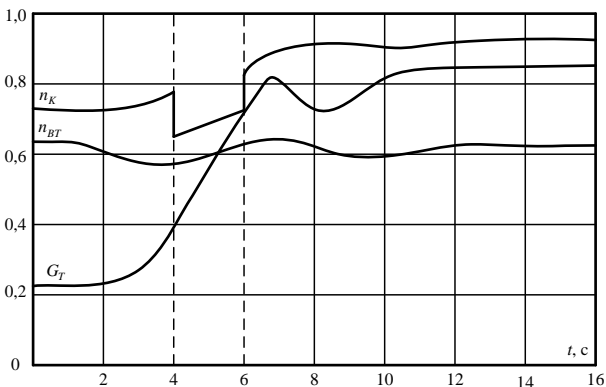


Рис. 7. Результати моделювання САК АД за відмови датчика  $n_K$  із нечітким регулятором

На рис. 6 і 7 наведено результати комп'ютерного моделювання роботи відмовостійкої САК АД

для двох випадків: використання класичних ПІ-регуляторів у контурів керування  $n_K$  і  $n_{BT}$  та під час використання нечіткої ІСК АД (режим «малий газ – номінал»). У кожному з випадків приймали появу відмову датчика швидкості обертання  $n_K$  в інтервалі часу 4...6 с.

При цьому на етапі парирування короткотривалої відмови датчика частоти обертання компресора АД  $n_K$  нечіткий регулятор зменшив коефіцієнт підсилення пропорційної частини другого ПІ-регулятора на 28% до моменту відновлення сигналу з датчика  $n_K$ , викид за витратою палива  $G_T$  став менше на 8%, ніж у разі використання лінійних алгоритмів керування.

**Висновки.** Таким чином, застосування відмовостійкої ІСК АД на основі нечіткої логіки дає змогу забезпечити локалізацію відмови та її парирування й зберегти при цьому необхідну якість процесів керування. Перевагою цього підходу є можливість використання знань про поведінку САК АД у вигляді правил, що дає змогу виконати оцінку ситуації на якісному рівні, тобто при цьому у базі знань вимальовується узагальнений образ ситуації керування.

Зазначимо, що під час синтезу нечітких алгоритмів керування АД необхідно приділяти велику увагу питанням мінімізації обсягу бази знань, оскільки за наявності великої кількості правил необхідне залучення більших обчислювальних ресурсів. Ураховуючи сучасні досягнення в галузі авіоніки, програмній реалізації обчислень на основі нечіткої логіки, можна передбачити застосування алгоритмів керування на базі нечіткої логіки для керування САК АД у реальному масштабі часу.

#### Список літератури:

1. Системна ефективність програмованої експлуатації авіоніки: монографія / В.П. Захарченко та ін. ; за заг. ред. В.М. Воробйова. Київ : НАУ, 2018. 192 с.
2. Ранченко Г.С., Буряченко А.Г. Перспективы развития электронных САУ АД. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. № 7(151). С. 95–100.
3. Кузнецова Т.А., Августинович В.Г., Губарев Е.А. Алгоритмы диагностики и парирувания отказов каналов измерения системы автоматического управления авиационным двигателем. *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2015. № 16. С. 5–14.
4. Кривошеев И.А., Годованюк А.Г. Использование моделей АД в составе адаптивных отказоустойчивых систем управления и контроля. *Вестник УГАТУ*. 2010. Т.14. № 5(40). С. 10–14.
5. Воробьев В.М., Захарченко В.А., Енчев С.В. Методология формирования концепции архитектуры программного обеспечения отказоустойчивой авионіки перспективных воздушных судов. *Електроніка та системи управління*. 2006. № 2(8). С. 138–148.
6. Енчев С.В., Киселев А.Д. Алгоритм и архитектура обеспечения отказоустойчивой авионіки перспективных воздушных судов. *ABIA-2006* : праці VII міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 25–27 вересня 2006 р. Київ, 2006. Т. II. С. 3.33–3.36.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ НЕЧЕТКОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

*Статья посвящена вопросу обеспечения отказоустойчивости систем управления авиационными двигателями. Система управления представляется как сложная логико-динамическая система, которая позволяет продолжать действия, заданные программой, после возникновения отказов. Для обеспечения отказоустойчивости в случае отказа электронной управляющей части предусмотрен переход на резервные гидромеханические системы. Применение отказоустойчивой интеллектуальной системы управления авиационными двигателями на основе нечеткой логики позволяет обеспечить локализацию отказа и ее парирование и сохранить при этом необходимое качество процессов управления. Разработана нечеткая отказоустойчивая система управления одновального авиационного двигателя по каналу скорости вращения свободной турбины и исследована его работа при отказе одного из датчиков.*

**Ключевые слова:** авиационный двигатель, интеллектуальная система управления, нечеткая логика, отказоустойчивость, адаптация.

## ENSURING THE FAULT-TOLERANCE OF FUZZY INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM OF AVIATION ENGINES

*The paper is devoted to the issue of providing fault-tolerance of aviation engine control systems. The control system is presented as a complex logical and dynamic system, which allows the ability to continue actions specified by the program after failures occur. In order to ensure fault tolerance in case of failure of the electronic control unit, a transition to a backup hydromechanical system is provided. The use of a fault-tolerant intelligent control system for aircraft engines based on fuzzy logic makes it possible to localize the failure and its countering while maintaining the required quality of control processes. A fuzzy fault-tolerant control system for a single-shaft aircraft engine was developed along a channel of rotational speed of a free turbine and its operation was investigated when one of the sensors failed.*

**Key words:** aircraft engine, intelligent control system, fuzzy logic, fault tolerance, adaptation

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.319

*Мірчук І.А.*

ПрАТ «Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості»

### ВПЛИВ РАДІАЦІЙНОГО МОДИФІКУВАННЯ ОБОЛОНКИ З БЕЗГАЛОГЕННОЇ КОМПОЗИЦІЇ, ЩО НЕ ПОШИРЮЄ ПОЛУМ'Я НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КАБЕЛІВ

*Визначено оптимальний технологічний коефіцієнт опромінення суднового кабелю СПОВЭнг-FRHF 12x2,5 з оболонкою із безгалогенної композиції, що не поширює полум'я марки Вінтес 2010.*

*Встановлено, що після радіаційної модифікації (зшивання прискореними електронами) оболонки підвищується стійкість кабелю до впливу індустриальної оливи, озону, механічної дії при підвищеній температурі.*

*Визначені енергія активації термічного окислення для термопластичної і зшитої безгалогенної композиції, що не поширює полум'я марки Вінтес 2010, залежність термічної витривалості оболонки від робочої температури кабелю. Виконано прогноз терміну служби кабелю в залежності від робочої температури. Проведені розрахунки показують, що в діапазоні максимальних робочих температур (80-90) °С термін служби кабелю з оболонкою зі зшитої безгалогенної композиції перевищує термін служби кабелю з оболонкою з термопластичної композиції в 1,5-2 рази.*

**Ключові слова:** кабелі, радіаційне модифікування, пучок електронів, безгалогенна композиція, що не поширює полум'я, коефіцієнт опромінення, зшивання, теплостійкість, термічна витривалість, енергія активації, напруження.

**Постановка проблеми.** Безгалогенні композиції, що не поширюють полум'я, в останні роки знаходять все більш широке застосування в кабельній промисловості, зокрема у виробництві пожегобезпечних кабелів.

Застосування таких композицій для ізоляції і оболонки кабелів дозволяє підвищити їх стійкість до поширення полум'я, знизити димоутворення під час горіння кабелю, при цьому виключивши виділення галогеновмісних корозійно-активних газів [1]. У результаті взаємодії газів, що містять галогени (як правило, це хлор), з вологою повітря утворюються кислоти, які завдають значної шкоди різному електричному обладнанню не тільки в зоні пожежі та безпосередній близькості до неї, а й на значній відстані.

Безгалогенні композиції для ізоляції та оболонки кабелів виготовляються на основі поліолефінів із введенням у полімер значної кількості (до 70 мас.%) антипіренів, що збільшують стійкість матеріалу до поширення полум'я.

Термопластичні безгалогенні матеріали, як і ПВХ пластикати, використовуються для ізоляції кабелів із робочою температурою на жилі до +70°C.

Однак в останні роки основні тенденції розвитку як кабелів загальнопромислового призначення, так і суднових, полягають у підвищенні робочої температури на жилі до +90°C, що дає можливість значно підвищити струмові навантаження при тому ж перерізі струмопровідних жил.

Збільшення допустимої тривалої робочої температури до +90°C забезпечується за рахунок використання для ізоляції матеріалів, що мають просторово зшиту полімерну сітку – гуми на основі етиленпропіленового або кремнійорганічного каучуків, зшитого поліетилену або зшитих композицій на основі поліолефінів [2].

На практиці використовуються 3 методи зшивання полімерних матеріалів:

1) за допомогою пероксидів (проводять, як правило, на лініях безперервної вулканізації, за рахунок розкладання перекисів, попередньо введених у полімер);

2) за допомогою органосиланових груп (здійснюється у водяній бані в результаті реакції введених у полімерну матрицю органосиланових груп із водою, з утворенням між макромолекулами зв'язків через групи O-Si-O);

3) радіаційний (модифікування полімеру здійснюють на спеціальних установках шляхом опромінення прискореними електронами, в результаті рекомбінації макрорадикалів молекул, що утворюються при опроміненні, матеріал набуває просторової структури).

Вплив технологічних параметрів радіаційного опромінення на електричні та фізико-механічні властивості кабельної ізоляції, виконаної з безгалогенної, що не поширює полум'я композиції на основі етилен-вінілацетату, а також кореляційні залежності між ними розглянуті в [3].

**Метою статті** є визначення впливу радіаційного модифікування на експлуатаційні властивості кабелю з оболонкою з безгалогенної, що не поширює полум'я, полімерної композиції на основі поліолефінів, а також визначення оптимальних технологічних параметрів опромінення, при яких забезпечується стійкість оболонки до зовнішніх факторів впливу.

**Виклад основного матеріалу.** Зразки судового кабелю марки СПОВЭнг-FRHF 12x2,5 з оболонкою з безгалогенної композиції, що не поширює полум'я, марки Вінтес 2010 піддавалися впливу прискорених електронів (радіаційному модифікуванню) на промисловому прискорювачі електронів ЕЛВ-2 при різних технологічних параметрах (коефіцієнтах опромінення).

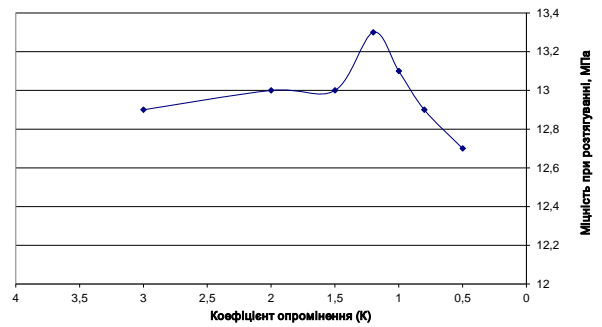
Коефіцієнт опромінення ( $K$ ) являє собою відношення швидкості проходження кабелю під пучком електронів, до струму пучка електронів. Відповідно, зі зменшенням  $K$ , збільшується ступінь опромінення оболонки кабелю, і навпаки.

Радіаційне модифікування оболонки проводили на ділянці опромінення зарядженими частинками в ТОВ «Азовська кабельна компанія», м. Бердянськ, при наступних технологічних параметрах:

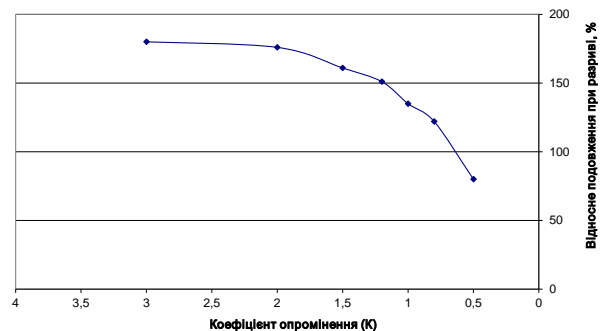
- 1) коефіцієнт опромінення  $K = 3; 2; 1,5; 1,2; 1,0$  і  $0,8$ ;
- 2) енергія електронів –  $1,2$  МеВ;
- 3) струм пучка електронів –  $10$  мА;
- 4) кількість проходів кабелю під пучком електронів –  $18$ ;
- 5) товщина оболонки кабелю –  $1,8$  мм.

**Вплив коефіцієнта опромінення на фізико-механічні властивості оболонки**

Залежність міцності при розтягуванні і відносного видовження при розриві від коефіцієнта опромінення приведено на рис. 1 і 2.



**Рис. 1.** Залежність міцності при розтягуванні оболонки від коефіцієнта опромінення



**Рис. 2.** Залежність відносного подовження оболонки при розриві від коефіцієнта опромінення

З отриманих даних видно, що зі зменшенням  $K$  (зі збільшенням ступеня опромінення) відносне подовження оболонки при розриві знижується і при  $K=0,5$  знаходиться нижче мінімальної допустимої величини (120%).

Міцність при розтягуванні оболонки, внаслідок її зшивання і виникання поперечних зв'язків між макромолекулами, незначно зростає при опроміненні з  $K=1,2$  і вище. При подальшому збільшенні дози опромінення спостерігається зниження міцності, викликане початком переважання процесу деструкції макромолекул над процесом зшивання.

**Вплив коефіцієнта опромінення на ступінь зшивання оболонки**

Ступінь зшивання оболонки визначали за допомогою вимірювання теплової деформації відповідно до методики, викладеної в [4].

Суть методу полягає у визначенні відносного подовження зразка матеріалу, що знаходиться під навантаженням  $20$  Н/см<sup>2</sup>, після 15 хвилин перебування в термостаті при температурі  $200^{\circ}\text{C}$ .

Згідно з вимогами [5] матеріал вважається зшитим, якщо його відносне подовження при випробуванні на теплову деформацію не перевищує 175%.

Як видно з представлених даних (Таблиця 1), безгалогенна композиція набуває зшитої струк-

тури при  $K=3$  і збільшує ступінь зшивання зі зниженням коефіцієнта опромінення.

#### **Вплив коефіцієнта опромінення на стійкість до впливу індустриальної оливи**

При експлуатації кабелів на судах або різних промислових об'єктах є висока ймовірність впливу на оболонку кабелю індустриальних олив. Для визначення стійкості суднових кабелів до впливу олив зразки оболонки у вигляді стандартних лопаток витримують в індустриальній оливі IRM902 при температурі  $100^{\circ}\text{C}$  протягом 24 годин, після чого визначають зміну величини міцності при розриві і відносного подовження, яка не повинна перевищувати 40% від вихідних (до витримки в оливі) величин [5].

Як видно з представлених у таблиці 1 даних, зразки безгалогенної композиції, що не піддавалася радіаційному модифікуванню і опроміненій з  $K=3$ , не є стійкими до дії оливи.

Однак при подальшому зниженні коефіцієнта опромінення і, відповідно, підвищення ступеня

зшивання стійкість до впливу оливи збільшується і при  $K=1,0-1,2$  відповідає встановленим вимогам.

Зразки, які характеризуються тепловою деформацією під навантаженням в діапазоні (10-50) %, мають найкращі показники стійкості до впливу індустриальної оливи.

Значне збільшення зміни відносного подовження після витримки в оливі при  $K=0,5$  і  $K=0,8$  пов'язано з низьким значенням відносного подовження вихідних зразків унаслідок їх переопромінення.

Виходячи з отриманих даних, визначено коефіцієнт опромінення оболонки  $K=1,2$ , при якому забезпечується оптимальне поєднання вихідних фізико-механічних параметрів, стійкості до оливи і деформації при підвищеній температурі.

Отже, подальші випробування проводили на зразку кабелю з коефіцієнтом опромінення  $K=1,2$ .

У таблиці 2 наведено результати порівняльних випробувань термопластичної (що не піддавалася радіаційному модифікуванню) і зшитой з

Таблиця 1

#### **Вплив коефіцієнта опромінення на теплову деформацію і стійкість до дії олив оболонки кабелю, виконаної з безгалогенної композиції на основі поліолефінів, що не поширює полум'я**

Коефіцієнт опромінення (K)	Теплова деформація в режимі $200^{\circ}\text{C}/20\text{H}/\text{cm}^2/15\text{ хв, \%}$	Фізико-механічні показники після витримки в оливі марки IRM902 в режимі $100^{\circ}\text{C} / 24\text{години}$	
		Зміна міцності при розтягуванні, %	Зміна відносного подовження при розриві, %
Без опромінення	Руйнування зразка на 1 хвилині	Зразки не придатні для випробувань	
3,0	150-175		
2,0	100-150	-68	-65
1,5	50-100	-52	-39
1,2	10-50	-26	-36
1,0		-33	-34
0,8	5-10	-42	+67
0,5		-39	+102

Таблиця 2

#### **Результати випробувань оболонки кабелю на стійкість до впливу озону**

Тип випробувань	Результати випробувань для оболонки	
	термопластичної	радіаційно-модифікованої
1. Вихідні фізико-механічні властивості		
1.1 Міцність при розтягуванні, МПа	12,5	13,2
1.2 Відносне подовження при розриві, %	189	151
2. Стійкість до дії озону	- температура в камері: $+40^{\circ}\text{C}$ - концентрація озону: $(200\pm 50)\times 10^{-6}$ об. % - тривалість дії: 72 години	
2.1 Міцність при розтягуванні, МПа	11,7	12,6
2.1.1 Зміна від вихідної величини, %	-6,4	-4,5
2.2 Відносне подовження при розриві, %	161	140
2.2.1 Зміна від вихідної величини, %	-14,8	-7,3

$K=1,2$  безгалогенної композиції на стійкість до впливу озону, проведені відповідно до вимог [6] метод В.

Зміна відносного подовження після впливу озону для радіаційно модифікованої оболонки в 2 рази нижче, ніж для оболонки, що не піддавалася зшивці.

На рис. 3-5 наведені результати порівняльних випробувань оболонки до і після радіаційного модифікування методами термічного аналізу (ТМА і ДСК).

Термомеханічний аналіз проводили при швидкості нагріву  $10^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$  з постійним механічним навантаженням  $20 \text{ Н}/\text{см}^2$ .

Для незшитої оболонки деформація починається при  $(80-90)^{\circ}\text{C}$  і після плавлення кристалічної фази полімеру, при температурі  $120^{\circ}\text{C}$  зразок повністю деформований.

Як видно на рис. 4, при температурі  $120^{\circ}\text{C}$  зразок зшитої оболонки зберігає 75% від початкової товщини і з подальшим підвищенням температури аж до  $190^{\circ}\text{C}$  практично не деформується.

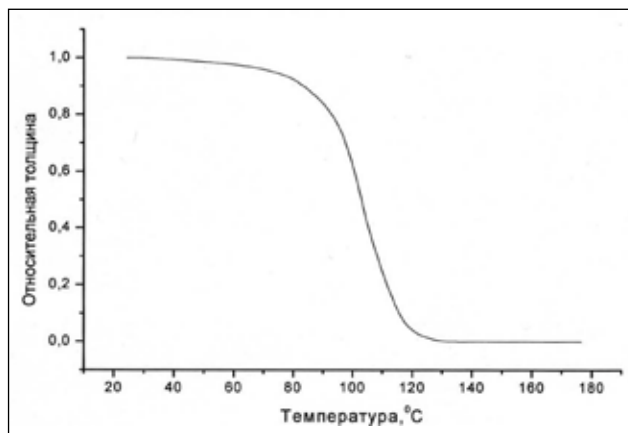


Рис. 3. Крива ТМА оболонки кабелю до опромінення (термопластична оболонка)

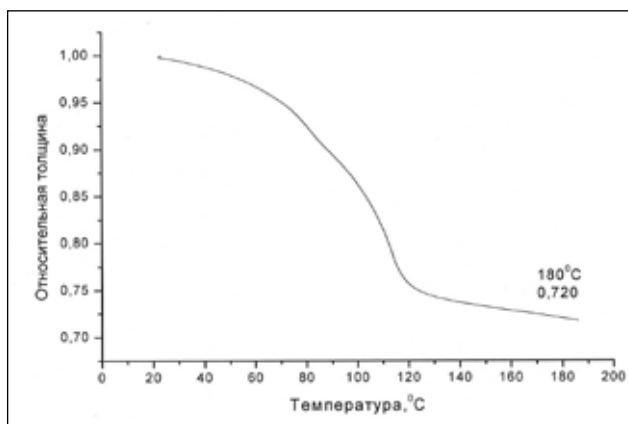


Рис. 4. Крива ТМА оболонки кабелю після радіаційного модифікування (зшита оболонка)

При випробуваннях методом диференціальної скануючої калориметрії визначено, що після радіаційного модифікування температура початку окислення оболонки знижується (рис. 5).

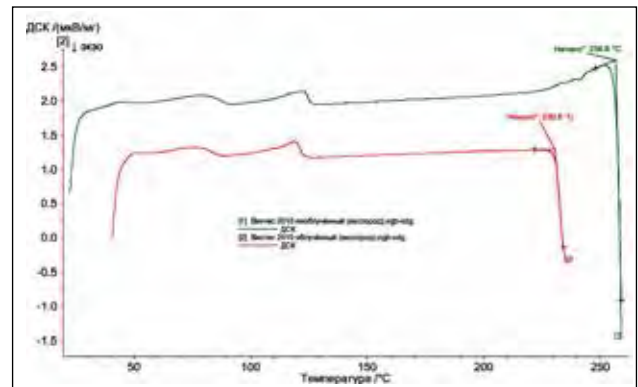


Рис. 5. Результати визначення температури початку окислення для термопластичної (1) і зшитої (2) безгалогенної композиції Вінтес 2010

Отриманий результат може свідчити про певне старіння матеріалу після дії прискорених електронів у процесі опромінення, що також підтверджується зниженням відносного подовження при розриві після радіаційного модифікування, як було зазначено вище.

Однак проведені випробування з визначення термічної витривалості показали, що розрахункові терміни напрацювання кабелів із оболонкою з радіаційно-модифікованої безгалогенної композиції Вінтес 2010 вище, ніж у кабелів з оболонкою, що не піддавалася опроміненню.

Визначення термічної витривалості оболонки (як компонента кабелю, найбільш схильного до впливу окислення та інших зовнішніх факторів) проводили відповідно до методики, викладеної в [7].

Метод випробувань полягає у визначенні часу термічного старіння, необхідного для досягнення граничного значення критичного параметра оболонки при різних температурах випробувань.

В якості критичного параметра оболонки було вибрано значення відносного подовження при розриві, що дорівнює 50%.

З отриманих даних видно, що час досягнення критичного параметра оболонки має експоненціальну залежність від температури випробувань.

Лінії регресії для термопластичної і радіаційно-модифікованої оболонки кабелю приведені на рис. 6.

Графік термічної витривалості термопластичної композиції описується лінійною функцією  $y=13550x-29,47$  з достовірністю апроксимації  $R^2=0,9987$  і при середньому відхиленні фактичних даних від лінії регресії  $S_y=0,032$ .

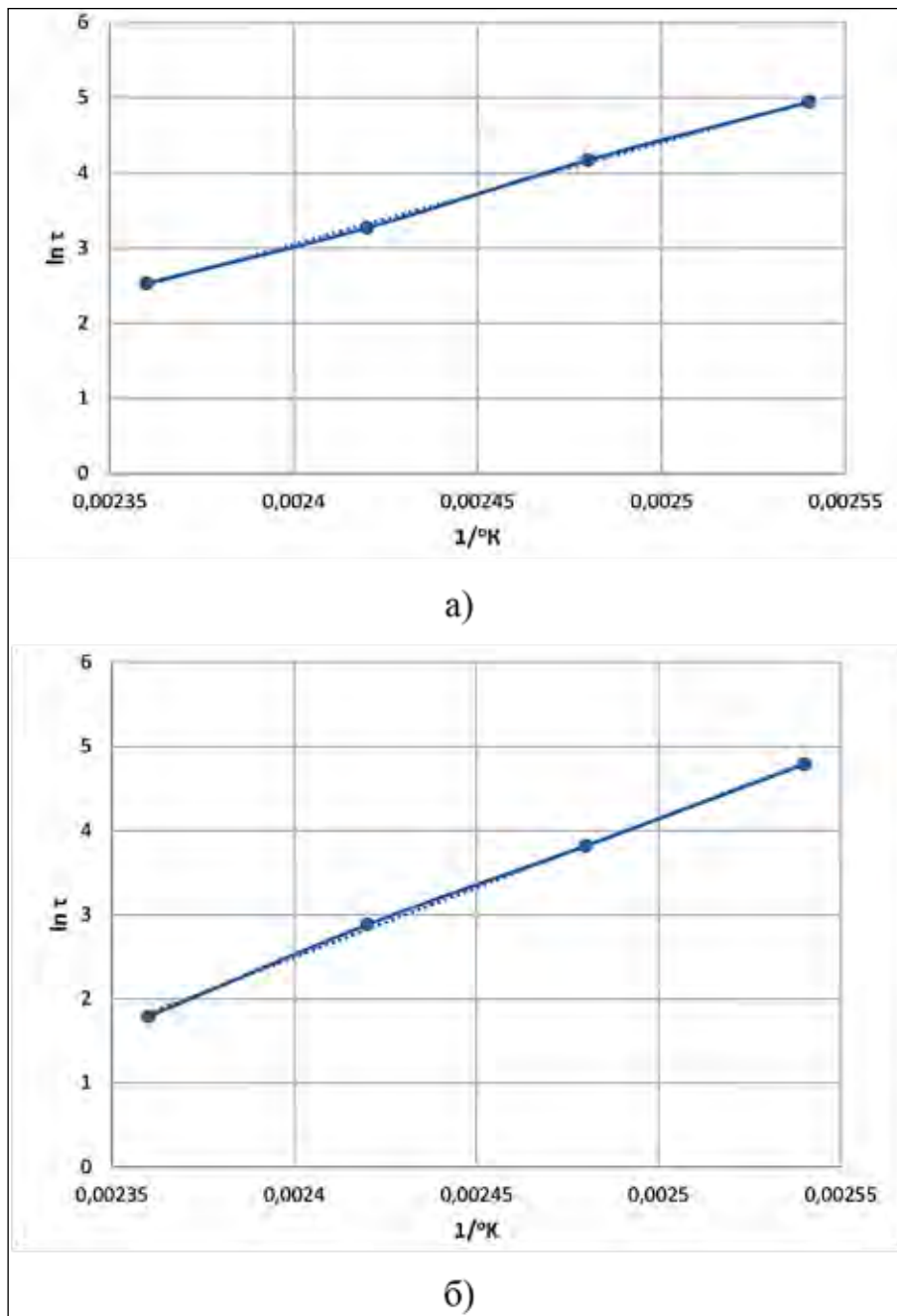


Рис. 6. Графік термічної витривалості оболонки з термопластичної (а) і радіаційно-модифікованої (б) безгалогенної композиції Вінтес 2010

Таблиця 3

Результати випробувань оболонки кабелю  
з термопластичної безгалогенної композиції марки Вінтес 2010

Температура (Т) старіння		$1/T, \text{K}^{-1}$	Час (t) до досягнення відносного подовження рівного 50%		$\ln t$
$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{K}$		година	доба	
150	423,15	0,00236	300	12,5	2,53
140	413,15	0,00242	630	26,3	3,27
130	403,15	0,00248	1560	65	4,17
120	393,15	0,00254	3360	140	4,94

Графік термічної витривалості зшитої композиції описується лінійною функцією  $y=16767x-37,748$  з достовірністю апроксимації  $R^2=0,9992$  і при середньому відхиленні фактичних даних від лінії регресії  $S_y=0,026$ .

Оскільки середнє відхилення фактичних значень від лінії регресії становить менше 0,16, то встановлена графічна залежність є придатною для прогнозування досягнення граничного стану.

На підставі графічних залежностей і отриманих коефіцієнтів регресії проведено розрахунок величин енергії активації термічного окислення і часу досягнення граничного стану в залежності від температури експлуатації для кабелів з оболонкою з термопластичної і зшитої (радіаційно-модифікованої) безгалогенної композиції марки Вінтес 2010 (таблиця 5 і рис. 7).

Виконані розрахунки показують, що в діапазоні максимальних робочих температур кабелю

(80-90)°C час досягнення критичного параметра оболонки зі зшитою безгалогенною композицією перевищує даний показник для оболонки з термопластичної композиції в 1,5-2 рази.

**Висновки.** Отримані результати випробувань показують, що радіаційне модифікування оболонки з безгалогенної композиції, що не поширює полум'я, марки Вінтес 2010 значно підвищує стійкість кабелю до впливу індустріальної оливи, озону, механічних дій при підвищеній температурі, а також збільшує напрацювання кабелю з максимальною робочою температурою на жилі 90°C в 1,5-2 рази.

Для кабелю марки СПОВЭнг-FRHF 12x2,5 визначено оптимальний коефіцієнт опромінення оболонки ( $K=1,2$ ), який дозволяє забезпечити необхідну стійкість кабелю до зовнішнього впливу при збереженні високих вихідних фізико-механічних характеристик оболонки.

Таблиця 4

**Результати випробувань оболонки кабелю з радіаційно-модифікованої безгалогенної композиції марки Вінтес 2010**

Температура (Т) старіння		1/T, K <sup>-1</sup>	Час (t) до досягнення відносного подовження рівного 50%		ln t
°C	°K		година	доба	
150	423,15	0,00236	144	6	1,79
140	413,15	0,00242	430	17,9	2,88
130	403,15	0,00248	1100	45,8	3,82
120	393,15	0,00254	2280	120	4,79

Таблиця 5

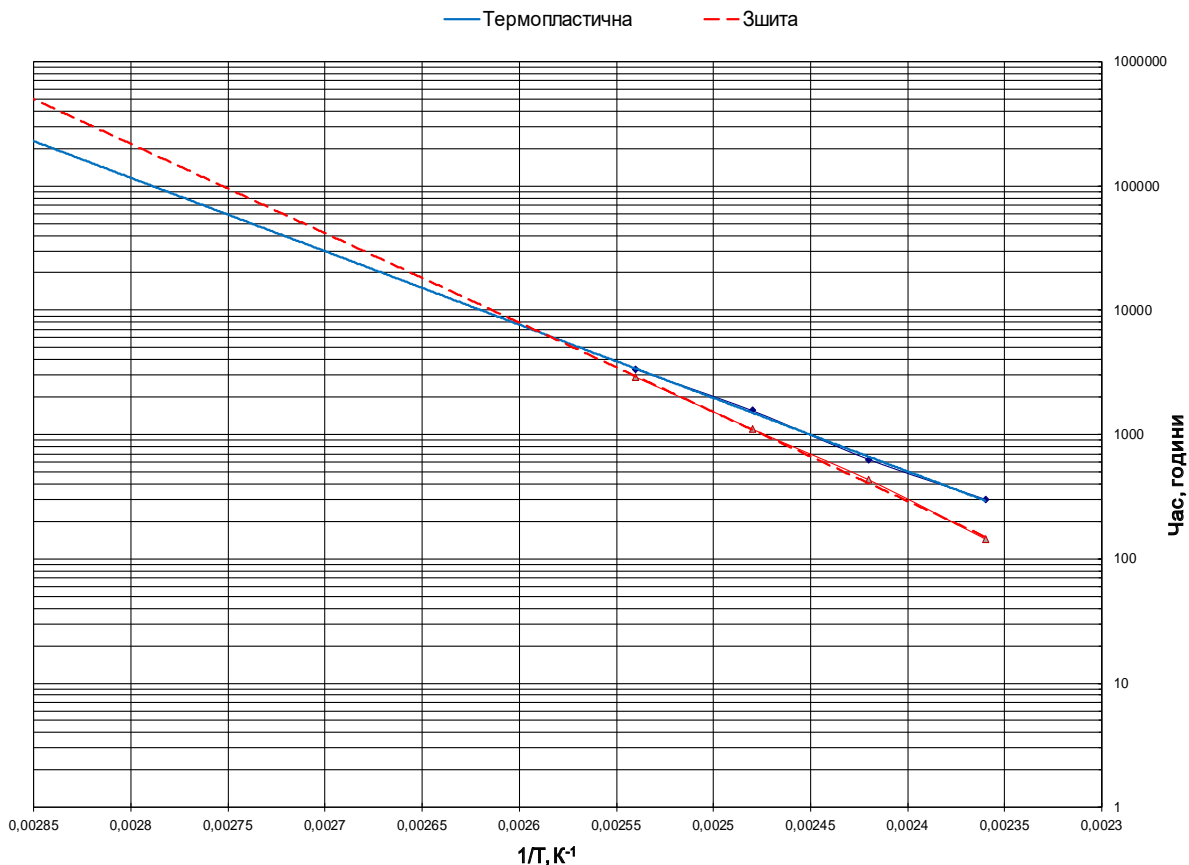
**Розрахунковий час досягнення оболонкою кабелю критичного стану**

Оболонка кабелю з термопластичної безгалогенної композиції Вінтес 2010				Оболонка кабелю зі зшитої безгалогенної композиції Вінтес 2010			
Енергія активації	Температура оболонки під час експлуатації кабелю	Час досягнення граничного стану		Енергія активації	Температура оболонки під час експлуатації кабелю	Час досягнення граничного стану	
		година	рік			година	рік
113	90	61320	7,0	138	90	101616	11,6
	85	102492	11,7		85	192720	22,0
	80	176076	20,1		80	370548	42,3

**Список літератури:**

1. Мирчук І.А. Безгалогенні композиції для кабельно-проводникової продукції. Переваги, недоліки і особливості застосування. *The Scientific Heritage*. 2018. № 30. С. 32–41.
2. Мирчук І.А. Беспрованних А.В. Обоснование оптимальной длительно допустимой рабочей температуры современных полимерных изоляционных композиций судовых кабелей. *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*. 2017. № 31(1253). С. 52–58.





**Рис. 7. Лінія критерію працездатності кабелю з оболонкою з термопластичної і зшитої (радіаційно-модифікованої) безгалогенної композиції Вінтес 2010**

3. Мирчук И.А. Беспрозванных А.В. Корреляция между электрическими и механическими характеристиками кабелей с радиационно-модифицированной изоляцией на основе безгалогенной полимерной композиции. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2018. № 4. С. 54–57. DOI : 10.20998/2074-272X.2018.4.09.

4. IEC 60811-507:2012. (2012). Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 507 : Mechanical tests – Hot set test for cross-linked materials.

5. IEC 60092-360:2014. (2014). Electrical installations in ships – Part 360 : Insulating and sheathing materials for shipboard and offshore units, power, control, instrumentation and telecommunication cables.

6. IEC 60811-403:2012. (2012). Electric and optical fibre cables – Test methods for non-metallic materials – Part 403 : Miscellaneous tests – Ozone resistance test on cross-linked compounds.

7. IEC 60216-1:2013. (2013). Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 1 : Ageing procedures and evaluation of test results.

### **ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ОБОЛОЧКИ ИЗ НЕ РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙ ГОРЕНИЕ БЕЗГАЛОГЕННОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КАБЕЛЕЙ**

*Определен оптимальный технологический коэффициент облучения кабеля СПОВЭнг-FRHF 12x2,5 с оболочкой из не распространяющей горение безгалогенной композиции марки Винтес 2010.*

*Установлено, что после радиационной модификации (сшивки пучком электронов) оболочки повышается стойкость кабеля к воздействию индустриального масла, озона, механическим воздействиям при повышенной температуре.*

*Определены энергия активации термического окисления для термопластичной и сшитой безгалогенной не распространяющей горение композиции Винтес 2010, зависимость термической стойкости оболочки от рабочей температуры кабеля. Выполнен прогноз срока службы кабеля в зависимости от рабочей температуры. Проведенные расчеты показывают, что в области максимальных рабочих*

температур кабеля (80-90)°C срок службы кабеля с оболочкой из сшитой безгалогенной композиции превышает срок службы кабеля с оболочкой из термопластичной композиции в 1,5-2 раза.

**Ключевые слова:** кабели, радиационное модифицирование, пучок электронов, безгалогенная не распространяющая горение композиция, коэффициент облучения, сшивка, теплостойкость, термическая устойчивость, энергия активации, наработка.

#### **INFLUENCE OF IRRADIATION OF THE SHEATH OF HALOGEN FREE FLAME RETARDANT COMPOUND ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF CABLES**

*The optimal technological radiation factor for the cable SPOVEng-FRHF 12x2.5 with the sheath of flame retardant halogen-free compound Vintes 2010 was defined.*

*After sheath irradiation (e-beam cross-linking) increase the resistance of the cable to industrial oil, ozone, and mechanical stress at elevated temperatures was determined.*

*The activation energy of thermal oxidation for thermoplastic and crosslinked halogen-free flame retardant compound Vintes 2010, sheath thermal endurance depending of the cable operating temperature have been determined. The forecast of the cable life-time depending on the operating temperature was carried out. The calculations show that in maximum operating temperatures range (80-90) °C the life-time of the cable with cross-linked sheath prolongs the life-time of the cable with thermoplastic sheath 1,5-2 times.*

**Key words:** cables, irradiation, electron beam, halogen-free flame retardant compound, radiation factor, crosslinking, heat resistance, thermal endurance, activation energy, operating time.

УДК 621.314.69

**Скрипченко О.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЗАРЯДНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

У статті проаналізовано особливості роботи зарядного пристрою під час навантаження на суперконденсатор з високими значеннями зарядного струму. Побудовано фізичний макет схеми, що працює від мережі. Показано, що за умов досягнення високих значень коефіцієнта заповнення зарядний пристрій працюватиме в режимах температурного максимуму. На прикладі побудованого пристрою визначено регульовальні характеристики, які забезпечать режим безперервного струму. В ході виконаних дослідів встановлено, що за збільшення коефіцієнта заповнення порушується температурний режим роботи. Надано рекомендації щодо встановлення додаткових монтажних кріплень на окремі силові каскади схеми.

**Ключові слова:** зарядний пристрій, акумулятор, DC-DC-перетворювач, режим безперервного струму, іоністор, stm32.

**Постановка проблеми.** В сучасному світі актуальними проблемами є автономне енергозабезпечення та енергоефективність різноманітних систем електроживлення. Запровадження з недавнього часу суперконденсаторів як джерел живлення електричної апаратури та машин набуває все більшого поширення за свої переваги перед літєвими акб, такими як високі пускові струми, порівняно невеликі втрати енергії в режимі очікування, відсутність ефекту старіння, відсутність зменшення повної ємності навіть після 100 000 циклів заряду-розряду, можливість заряджання та розряджання іоністорів великими струмами. Для таких видів зберігання енергії може бути використана система заряджання надвисоких струмів, що зменшить час заряду в десятки разів порівняно зі звичайними АКБ. Зазначене сформувало необхідність розроблення високоефективних перетворювачів напруги для перетворення отриманої від альтернативних джерел змінної напруги мережі на стандартизовану постійну напругу.

Під час використання суперконденсаторів як накопичувачів енергії бажано застосовувати спеціалізовані мікросхеми. Сучасні суперконденсатори мають ємність до 100 Ф, але їх робоча напруга не перевищує 2,7 В. Оскільки більшість систем вимагає вищої напруги живлення, багато суперконденсаторів представлені як пара паралельно з'єднаних в батарею елементів в єдиному корпусі з додатковим виводом із загальної точки [2].

Концепція створюваного перетворювача передбачає перетворення напруги мережі альтернативних джерел на постійну напругу з можливістю повернення невикористовуваної енергії до лінії. Керу-

вання роботою ключового транзистора перетворювача здійснюється за допомогою плати stm32 nucleo.

**Постановка завдання.** Метою статті є вибір та створення кращої топології схеми заряду іоністорів, що забезпечить високий за значенням струм навантаження, характерними рисами якої виступатимуть відносна простота конструкції та собівартість.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

*Аналіз наявних топологій схем.*

Загалом існує багато різних топологій схем. Розроблення зарядного пристрою підпорядковує умову заряджання від мережі змінної напруги 220В. Для заряджання слід перетворити вхідні параметри на необхідні для досягнення умови задачі.

Оскільки розроблення передбачає практичну реалізацію в кінцевий пристрій, питання вибору перетворювача напруги є ключовим, який за своїми характеристиками, ціною та масо-габаритами найкраще буде підходити до поставленої задачі.

Розглянувши популярні топології силових перетворювачів, таких як зворотноходовий, прямоходовий, мостовий, напівмостовий і резонансний, можемо для кожної з них зазначити галузі застосування.

Основними параметрами імпульсних перетворювачів є такі.

1) Діапазон вхідних напруг. На жаль, завжди є обмеження не тільки на максимальну, але й на мінімальну вхідну напругу. Значення цих параметрів завжди вибирається з деяким запасом [3].

2) Діапазон вихідних напруг. Через обмеження на мінімальну та максимальну тривалість імпульсу діапазон значень вихідної напруги обмежений [1].

3) Максимальний вихідний струм. Цей параметр може бути обмежений цілою низкою чинників,

зокрема максимально допустимою потужністю розсіювання, кінцевим значенням опору силових ключів.

4) Частота роботи перетворювача (кГц). Чим вище частота перетворення, тим простіше зробити фільтрацію вихідної напруги. Це дає змогу боротися з перешкодами та знижувати значення номіналів елементів зовнішнього L-C-фільтра, що приводить до збільшення вихідних струмів та зменшення габаритів. Однак зростання частоти перетворення збільшує втрати на перемикання силових ключів і збільшує індуктивну складову перешкод, що явно є небажаним для тривалої роботи перетворювача за великих значень струму [3].

5) Інші параметри (опір каналів інтегральних силових ключів (мОм), власний струм споживання (мкА), тепловий опір корпусу тощо). Вони є менш важливими, але їх також слід враховувати.

Для зворотногоходових перетворювачів характерні такі особливості, як простота побудови та низька собівартість схеми за невеликих потужностей. За досягнення високих показників струму навантаження через ключовий транзистор первинної обмотки на навантаженні спостерігається пульсація напруги, що не є бажаним за повного заряду іоністорів, тим більше тих, що послідовно з'єднані. В таких схемах дуже високими є вимоги до вхідного конденсатора та самого транзистора.

Прямоходовий перетворювач спрямований на живлення побутової апаратури низької потужності, що також не задовольняє умови задачі.

Резонансний перетворювач, маючи таку перевагу, як висока робоча частота, малі габарити та простота фільтрації завад на навантаженні, краще підходить для живлення моніторів комп'ютерів, TV та іншої техніки з вимогами до високочастотної розгортки [4].

Двотактна схема, як і напівмостова, вирізняється порівняно зменшеними рівнями завад, що не є принциповим для розроблення схеми, а якщо вона має більшу кількість елементів, то надійність зменшена, собівартість збільшена, рівень ККД є не дуже високим, що підпорядковує використання монтажних елементів охолодження [5].

Підсумовуючи все вищесказане, можемо сказати, що понижувальний перетворювач DC-DC разом з випрямлячем на силовому трансформаторі, діодним мостом та фільтруючим конденсатором є кращим вибором за такими параметрами, як необхідна потужність до 500 Вт за великого струму навантаження, відносна простота топології перетворювача, високий ККД самого перетворювача, краща завадостійкість порівняно з імпульсними джерелами жив-

лення. Серед недоліків такої установки слід назвати низький ККД силового трансформатора, підвищені вимоги до фільтруючого конденсатора, порівняно великі масогабарити пристрою.

Перетворювачі напруги/струму мають вхідний каскад, який складається з трансформатора, випрямляча та фільтруючих елементів. Цей каскад бере участь у перетворенні вхідної синусоїдальної напруги мережі, трансформатор понижувального типу змінює напругу мережі на вихідну понижену синусоїдальну із середнім значенням струму 3,4 А. Випрямляч віднімає негативні імпульси, а фільтр у його складі випрямляє напругу, струм, які поступають на регулюючий елемент, що підпорядкований системі керування. Саме вона визначає те, яку модуляцію треба синхронізувати на навантаження. На рис. 1 показана функціональна схема перетворювача. Регулюючим елементом є блок ШІМ. Він регулює скважність імпульсів, коефіцієнт їх заповнення на виході. Форма імпульсів задається із системи керування. Вона є мікроконтролером на базі STM та колом зворотного зв'язку. Оскільки деякі мікроконтролери мають широкі можливості, включаючи широтно-імпульсну модуляцію, аналогово-цифрові перетворювачі високої точності, операційні підсилювачі напруги, доцільно вибирати саме такі із сімейства STM. Вони значно зручніші під час кодування на мовах високого рівня завдяки об'єднанню багатьох блоків в один, зменшують ефективну площу плати, мають менші показники тепловиділення, споживання енергії. Коло зворотного зв'язку включає 2 блоки датчиків струму та напруги. Воно призначене для відслідковування вхідної напруги та струму іоністорів для запобігання перезаряду та високого нагріву. За надто високих показників, зазначених в прошивці мікроконтролера, останній керує блоком ШІМ, згодом зменшується коефіцієнт заповнення імпульсів, отже, середні показники струму, напруги, що поступають на навантаження.

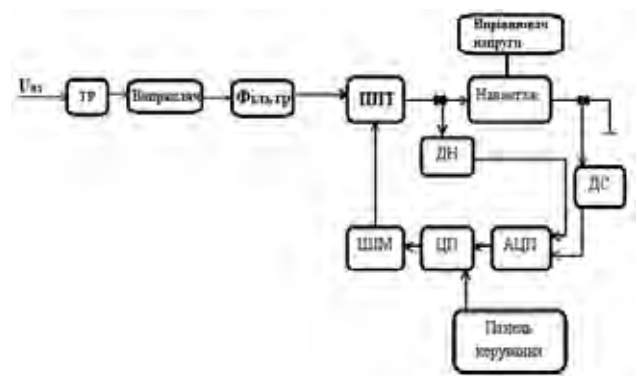


Рис. 1 Функціональна схема понижуючого перетворювача напруги

Знімання вимірювальної напруги, розміщене перед навантаженням, є шунтом, з якого знімаються показники, які через дільник напруги надходять в АЦП мікроконтролера. Датчик струму розташований на мінусовому виводі навантаження також до АЦП. Отже, система керування на рис. 1 є STM-мікроконтролером, який включає такі блоки, як блок ШІМ, центральний процесор, аналогово-цифровий перетворювач. Також до мікроконтролера в АЦП надходить інформація про стан навантаження (коло зворотного зв'язку). Зарядний пристрій складається з двох основних топологій електричних схем, а саме понижувального перетворювача DC-DC, діодного мостового перетворювача напруги. Останній має три основних компоненти. Першим вхідним компонентом є силовий трансформатор, який понижує вхідну синусоїдальну напругу з 220 В на 15 В. На рис. 2 показана принципова схема зарядного пристрою. Другим компонентом вхідного каскаду є діодний міст (VD2-VD5), перетворюючий напругу на вторинній обмотці Tr1 на імпульсну. Імпульсна напруга згладжується фільтруючим конденсатором C1 відповідної ємності. Понижуючий перетворювач DC-DC умовно поділений на силову частину та частину керування. Силова частина перетворювача складається з ключового транзистора VT2, який, працюючи в імпульсному режимі, регулює напругу навантаження. Дросель відповідної індуктивності та параметрів протікаючого струму, встановлений після транзистора, виконує роль накопичувача енергії. Під час відкритого стану транзистора VT2 струм, що протікає через дросель L1 на навантаження, накопичується в

ньому до межі насичення. Під час закриття транзистора каскад перестає отримувати живлення від мережі, а єдиним джерелом живлення залишається дросель, який розряджається на навантаження.

Для цього встановлений зворотній діод VD1, який утворює електричне коло під час вимкненого VT2. Навантаження представлено у вигляді двох послідовно з'єднаних конденсаторів високої ємності C6, C7. Для вирівнювання напруги на конденсаторах паралельно встановлені резистори високого опору R17, R18. Система керування складається з мікроконтролера STM32 (значно спрощує систему керування перетворювача за собівартості 54 грн. за модель STM32F103C8T6), системи зворотного зв'язку щодо напруги, виконаної на базі, двох послідовно з'єднаних резисторів, паралельно підключених до навантаження R3, R4. Для корекції значень струму навантаження встановлений шунт, виконаний на базі низькоомного резистора R5. Для усунення завад під час зчитування даних напруги, струму зворотного зв'язку встановлені конденсатори низької ємності C3, C4. Для живлення мікроконтролера має бути встановлено лінійний стабілізатор напруги у вигляді мікросхеми VR1, яка за допомогою допоміжних дільників напруги R11, R12 живить STM32. Під час заряду суперконденсаторів до напруги 3,2 В мікроконтролер дасть сигнал про закриття ключового транзистора, отже, заряджання буде припинено. Причому задля усунення перенапруги струм навантаження зменшується за ступенем заряду іоністорів. Так, за напруги 2,6 В на навантаження скважність становить 60%, відповідно, струм

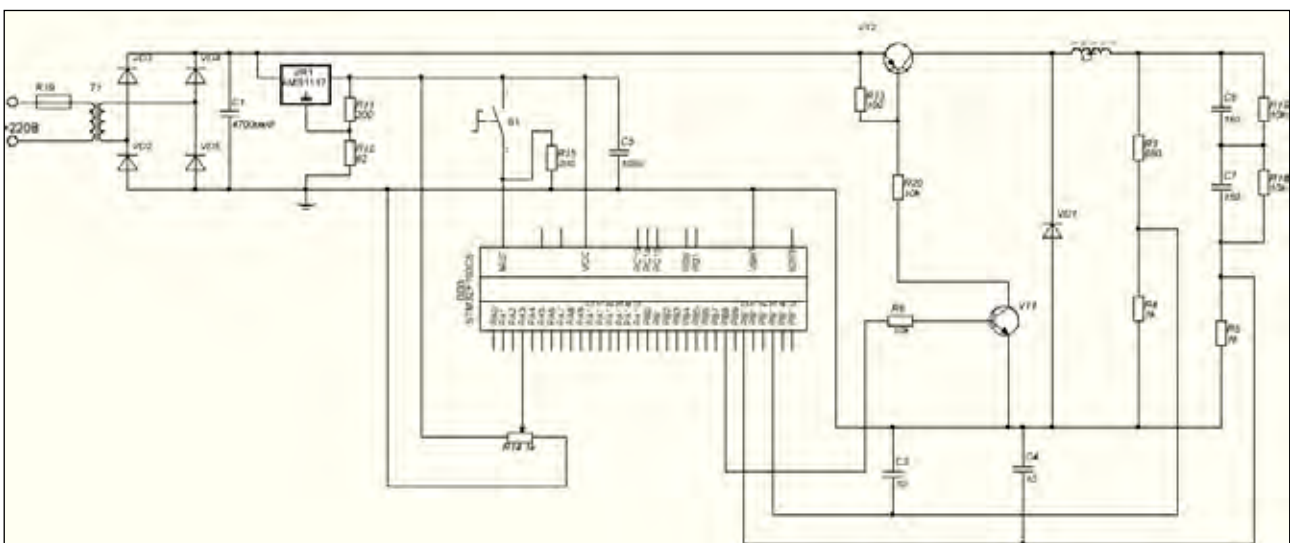


Рис. 2. Принципова схема зарядного пристрою

становить 1,2 А, за 3 В–90%, відповідно, 300 мА до повного заряду. Перемикач S1 є кнопкою перезавантаження мікроконтролера. Резистор R14 виконує функцію реостату. Змінюючи опір на резисторі, можемо регулювати струм навантаження. Передусім це необхідно задля виконання граничних умов заряджання деяких гібридних суперконденсаторів, які мають спеціальний подвійний електричний шар, а за хімічної будови їм притаманні особливості звичайних літієвих батарей. В таких іоністорах є обмеження у значеннях максимального струму заряджання. Завдяки АЦП перетворений сигнал надходить на ОП, де згодом зчитується ЦП, регулюється скважність імпульсів ключового транзистора. Розрядність АЦП у 12 біт є достатнім показником для точного зчитування напруги навантаження. За бажання задля отримання більш точних даних з навантаження в коло зворотного зв'язку може бути встановлений компаратор, працюючий тільки від додатної напруги +5В, виконуючий роль підсилення вихідного сигналу, завдяки чому регулювання буде більш точним. Транзистор VT1 виконує функцію драйвера.

Оскільки мікроконтролер не може подавати на базу транзистора негативні імпульси, доцільно встановити драйвер, який є рпн-транзистором, колектор якого під'єднаний до бази транзистора VT2, а емітор – до землі.

На рис. 3 показана схема включення ключового транзистора.

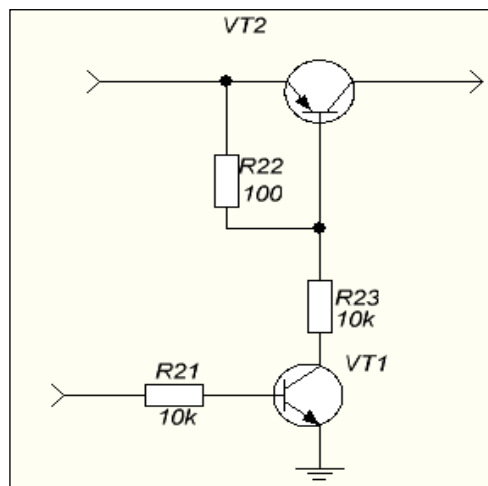


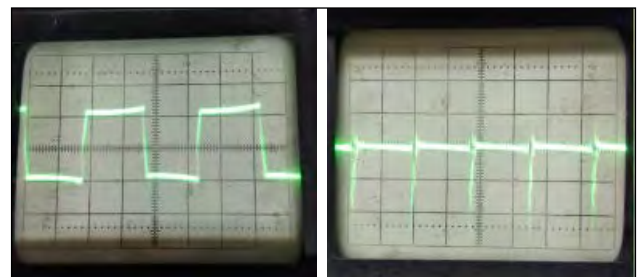
Рис. 3. Схема включення ключового транзистора

Коли пін порта stm32 подає додатній імпульс, відкривається перехід база-емітор на транзисторі VT1, створюється різниця потенціалів між VT1 та вхідним ланцюгом, що викликає відкриття VT2. Чим більше величина індуктивності, тим вище максимальний вихідний струм через зниже-

ний струм пульсацій. Чим нижче індуктивність, тим менше габарити пристрою. Зауважимо, що котушка повинна завжди мати номінальний струм вище максимального струму, тому що струм збільшується під час зменшення індуктивності. Якщо не зазначено діапазон індуктивностей, можна скористатися таким рівнянням (1), яке досить точно оцінює величини індуктивності:

$$L = \frac{V_{in}(V_{out} - V_{in})}{\Delta i_L f_s V_{out}} \quad (1)$$

де  $V_{in}(\min)$  – мінімальна вхідна напруга,  $V_{out}$  – задана вихідна напруга,  $f_s$  – мінімальна частота комутації перетворювача (задаємо 1кГц),  $\Delta I_L$  – приблизна величина струму пульсацій котушки (див. нижче). Струм пульсацій котушки індуктивності можна розрахувати, оскільки індуктивність невідома. Струм пульсацій котушки індуктивності можна оцінити як такий, що приблизно дорівнює величині 20–40% від вихідного струму. Перетворювач розсіює потужність, а розрахунок з урахуванням ККД дає змогу отримати більш реальне значення коефіцієнта заповнення. Виходячи з мінімальної індуктивності дроселя та середнього струму дроселя, вибираємо дросель CDEP147 з такими параметрами:  $L_{др} = 471 \text{ мкГн}$ ;  $I_{Lcr} = 1,5 \text{ А}$ ;  $R_L = 0,1 \text{ Ом}$ .



а) за к. з. 60%; б) за к. з. 95%

Рис. 4. Плата, використана для перевірки схеми: а) за к. з. 60%; б) за к. з. 95%

Дослідження побудованої схеми, яка зображена на рис. 4, 5, проведені в умовах лабораторного стенду. Як основа був використаний корпус блока живлення формату ATX персонального комп'ютера. Для зниження амплітудного значення напруги мережі був взятий трансформатор тороїдального типу. Середнє значення напруги збігається з характеристиками. Для контролювання напруги навантаження використаний ключовий транзистор VT2, коефіцієнтом заповнення якого керує мікроконтролер. Вид модуляції вибраний широтно-імпульсний. Коефіцієнт заповнення імпульсів був вибраний таким чином, щоби температурний режим роботи транзистора в імпульсному режимі зберігався на достатньому рівні.

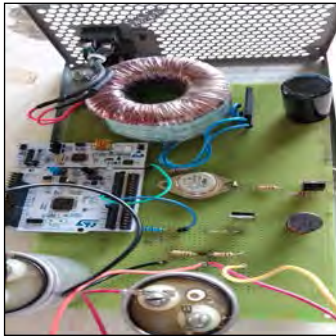


Рис. 5. Плата, використана для перевірки схеми

За коефіцієнта заповнення 60% температура ключового транзистора VT2 сягала 52 градусів в умовах відкритого стенду за температури лабораторії у 22 градуси за Цельсієм. При цьому струм навантаження склав 2,1 А, що є непоганим результатом. За коефіцієнта заповнення імпульсів більше 80% транзистор виходив за граничні рамки температур, маючи 94 градуси. Отже, доцільно встановити на монтажне кріплення транзистора алюмінієвий радіатор, площі у 100 мм<sup>2</sup> буде достатньо для здійснення ефективної роботи в умовах підвищеного коефіцієнта заповнення імпульсів. Дросель також мав високі показники температури, близько 100 градусів, що не є критичним, а в закритому корпусі впливатиме на температуру повітря всередині, що спрямує до нагріву елементів схеми, тому для вентиляції схеми в закритому блоці кращим виходом буде

використання вентилятора з гідродинамічним підшипником та живленням до 5 В. Живлення можна реалізувати у каскаді стабілізатора напруги AMS1117. Фотографії діаграм з осцилографа коефіцієнта заповнення імпульсів ключового транзистора VT2 представлені на рис. 5.

**Висновки.** В ході досліджень була побудована та реалізована на практиці принципова схема зарядного пристрою для двох послідовно з'єднаних у батарею суперконденсаторів на базі мікроконтролера STM32. Здійснені огляди наявних рішень топологій схем для його заряджання, вибрана краща з них за такими критеріями, як простота побудови, високі струми навантаження, відносна невелика собівартість пристрою, прийнятні масогабарити, необхідний та достатній рівень пульсацій випрямленої напруги на виході перетворювача. Режим заряджання реалізований ключовим транзистором, керованим мікроконтролером, живлення якого включене у склад схеми окремим каскадом. В ході виконаних дослідів встановлено, що під час збільшення коефіцієнта заповнення порушується температурний режим роботи. Доцільно встановити на монтажне кріплення транзистора алюмінієвий радіатор, площі в 100 мм<sup>2</sup> буде достатньо для більшого значення струму навантаження та швидшої зарядки. Реалізована схема характеризується простотою конструкції, надійністю, високими показниками струму заряджання, достатньою точністю зчитування зворотного зв'язку.

#### Список літератури:

1. Перетворювальна техніка. Ч. II : навчальний посібник / Ю.П. Гончаров, О.В. Будьонний, В.Г. Морозов, М.В. Панасенко, В.С. Руденко, В.Я. Ромашко. Харків, 2000. 360 с.
2. Моин В.С. Стабилизированные импульсные преобразователи. Москва, 1986. 376 с.
3. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. Москва, 1988. 294 с.
4. Шелест М.Б., Гайда П.І. Основи будови та експлуатації акумуляторних батарей. Суми, 2014. 210 с.
5. Soh L.-Q., Tiew Ch.D. Building of a portable solar ac & dc power supply. *Intelligent Systems, Modelling and Simulation*. DOI: 10.1109/ISMS.2014.82.
6. Datasheet STM32F0. *Practical electronics*. 2018. URL: <http://www.ruselectronic.com>.

#### ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА

*В статье проанализированы особенности работы зарядного устройства при нагрузке на суперконденсатор с высокими значениями зарядного тока. Построен физический макет схемы, которая работает от сети. Показано, что при условиях достижения высоких значений коэффициента заполнения зарядное устройство будет работать в режимах температурного максимума. На примере построенного устройства определены регулировочные характеристики, которые обеспечивают режим непрерывного тока. В ходе выполненных исследований установлено, что при увеличении коэффициента заполнения нарушается температурный режим работы. Предоставлены рекомендации по установлению дополнительных монтажных креплений на отдельные силовые каскады схемы.*

**Ключевые слова:** зарядное устройство, аккумулятор, DC-DC преобразователь, режим непрерывного тока, ионистор, stm32.

### CHARGER FOR SUPERCAPACITOR

*In the article analyzed the features of the charger when the load on the supercapacitor with high values of charging current. The physical layout of the scheme is working on the network. It is shown that in conditions of achieving high values of the fill factor, the charger will operate in temperature maximum modes. On the example of the constructed device, the regulating characteristics are determined, which will provide the modes of continuous current. In the course of the research, it was found that with an increase in the fill factor, the temperature regime of operation is disturbed. These recommendations for installing additional mounting mounts on separate power stages of the circuit.*

**Key words:** *charger, battery, DC-DC-converter, continuous current modem Ionistor, stm32.*



УДК 621.31

**Терещенко Т.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Федін І.С.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Овсієнко М.Ю.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Лайкова Л.Г.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**АВТОНОМНІ ІНВЕРТОРИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ  
З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ**

*Розглянуто особливості застосування автономних інверторів у системах електроживлення з відновлюваними джерелами енергії. Розглянуто топології та принципи роботи інверторів з імпедансним та квазі-імпедансним ланцюгом у входному колі. Досліджено каскадний багаторівневий інвертор із використанням квазі-Z-інверторів як комірков. Проведено моделювання вказаного типу інверторів. На основі проведеного моделювання та даних, вказаних у літературі, наведено коефіцієнти нелінійності вихідної напруги, визначено переваги і недоліки кожної зі схем інверторів та надано рекомендації щодо їх застосування.*

**Ключові слова:** автономний інвертор, Z-інвертор, перетворювач із квазі-імпедансною ланкою.

**Постановка проблеми.** У результаті швидкого розвитку та поширення технологій Smart Grid та Місго Grid значно зріс попит на ринку перетворювальних пристроїв, що здатні перетворити сталу напругу від відновлюваного джерела енергії (ВДЕ) на змінну напругу побутової мережі із заданими параметрами якості електричної енергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перетворення постійної напруги на змінну здійснюється за допомогою інверторів. Інвертори поділяються на інвертори з джерелом напруги VSI та інвертори з джерелом струму CSI [1]. В інверторі VSI джерело постійного струму має малий або незначний імпеданс. Внаслідок низького внутрішнього опору напруга на виході залишається практично постійною при зміні навантаження. Коротке замикання на виході інвертора викликає швидке зростання струму. В інверторі CSI джерело постійного струму має високий імпеданс. Через великий внутрішній опір напруга на виводах інвертора не залишається постійною у разі зміни навантаження, а змінюється зі зміною навантаження.

Крім того, як інвертор із джерелом напруги (VSI), так і інвертор із джерелом струму (CSI) мають спільний недолік: у них не передбачено регулювання входної напруги.

У разі застосування автономних інверторів у системах електроживлення з відновлюваними джерелами енергії для перетворення сталої вихідної напруги вітрогенератора або сонячної панелі можливе короткочасне зменшення входної напруги перетворювача через несприятливі зовнішні умови роботи альтернативних джерел енергії (як-от недостатня освітленість для сонячних панелей та відсутність необхідного вітрового потоку для вітрогенератора) [2].

За таких умов доцільне використання інверторів за схемою з імпедансним (скорочено як Z-перетворювач) та квазі-імпедансним (скорочено як квазі-Z-перетворювач) ланцюгом у входному колі через можливість роботи у додатковому режимі, що має назву «режим пробою» і є аномальним для традиційних мостових схем інверторів. Застосування цього режиму дає змогу підвищувати амплітуду вихідної напруги перетворювача,

що може бути використано для зменшення впливу означених несприятливих зовнішніх умов [3].

З метою зменшення коефіцієнта нелінійності вихідної напруги (THD) застосовують схеми багаторівневих інверторів із використанням комірок, побудованих на основі топології Z- та квазі-Z-перетворювачів [4]. Отримані переваги призвели до подальшого розвитку цих топологій та їх широкого застосування у схемах статичних компенсаторів, перетворювачів частоти для електромагнітних двигунів та перетворювачів енергії для відновлюваних джерел електроенергії [5].

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження інверторів з імпедансним та квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі та створення рекомендацій щодо їх застосування в системах електроживлення з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ).

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

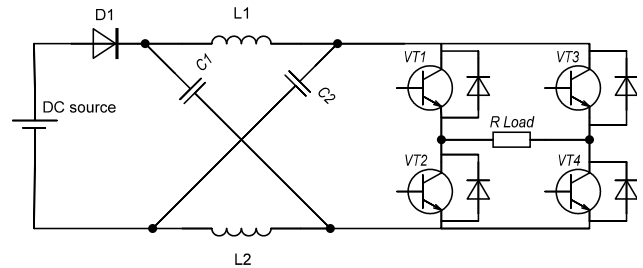
*Інвертор з імпедансним ланцюгом у вхідному колі (Z-інвертор).* При побудові систем електроживлення з ВДЕ як джерела постійного струму особливої уваги заслуговують перетворювачі з імпедансним ланцюгом у вхідному колі [6]. Z-інвертор являє собою мостовий перетворювач напруги з ланкою постійного струму на вході, що складається зі з'єднаних у X-конфігурації двох конденсаторів і дроселів (рис. 1).

Джерелом постійного струму може бути сонячна панель, паливний елемент або інше джерело сталого струму; навантаження може мати індуктивний, ємнісний, резистивний характер або їх комбінацію. Топологія схеми включає чотири або шість силових ключів для однофазного та трифазного інверторів відповідно, якими можуть виступати комбінація IGBT-транзистора з антипаралельним діодом або MOSFET-транзистор. Для запобігання можливого розряду конденсаторів через джерело в схемі використано діод [5].

Використання імпедансного ланцюга дає змогу використовувати додатковий режим роботи силових ключів – режим «пробою».

Робота імпедансного ланцюга Z-інвертора відбувається у три етапи. На першому етапі інвертор працює в одному з двох стандартних режимів комутації ключів (табл. 1, п. 1). Енергія альтернативного джерела живлення передається до навантаження аналогічно до звичайного мостового інвертора та одночасно з цим відбувається заряд конденсаторів. На другому етапі інвертор працює у режимі «пробою», за якого комутуються ключі однієї або обох стійок інвертора (табл. 1, п. 2). Конденсатори розряджаються, в результаті

чого відбувається накопичення енергії дроселем. Навантаження та джерело живлення на цьому етапі від'єднані від перетворювача. На третьому етапі комутація ключів знову відбувається у стандартному режимі. Енергія, накопичена дроселями, додається до енергії, що передається джерелом і надходить до навантаження табл. 1, п. 3.



**Рис. 1. Інвертор з імпедансним ланцюгом у вхідному колі (Z-інвертор)**

Режим «пробою» дає змогу збільшити вхідні струм та напругу мостового інвертора, що відбираються від джерела сталого струму без встановлення додаткових перетворювачів на вхід схеми. Використання режиму «пробою» у точці відбору максимальної потужності дає змогу передати максимальну потужність сонячної батареї до навантаження, що, своєю чергою, дає змогу максимально раціонально використовувати площу сонячної батареї.

Недоліками схеми є перевантаження силових ключів у режимі «пробою», оскільки струм через них за цього типу комутації може бути удвічі більшим за амплітудні значення, допустимі для звичайного режиму комутації.

За результатами симуляції коефіцієнт нелінійних спотворень для схеми Z-інвертора без встановлення вихідного фільтра становить 80,81% при роботі на активне навантаження. У разі встановлення вихідного фільтра це значення зменшується до 1,836%.

*Інвертор з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі (QZ-інвертор).* Квазі-імпедансні перетворювачі вперше були представлені в 2008 р. Метою створення цієї топології було підвищення амплітуди максимальної вихідної напруги за застосування режиму «пробою», зменшення навантаження на конденсатори та підтримка сталого струму джерела, зменшення кількості етапів перетворення та підвищення завадостійкості [2]. Квазі-Z-інвертори використовуються для інтеграції фотоелектричних перетворювачів із мережею MicroGrid і як інтерфейсні перетворювачі для паливних елементів [7].

На рис. 2 наведена загальна структура інвертора з квазі-імпедансним джерелом. Імпедансна мережа інвертора складається з двох індукторів L1 і L2 і двох конденсаторів C1 і C2. Індуктор L1, присутній в інверторі квазі-імпедансного джерела, зменшує вхідний струм. Напруга конденсатора C1 нижча, ніж у випадку Z-інвертора.

Принцип роботи інвертора з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі, аналогічно до Z-інвертора, можна описати в три етапи. На першому етапі за одного з двох стандартних режимів комутації ключів відбувається заряд конденсатора C1 за ланцюгом: джерело живлення – дросель L1 – діод D1 – конденсатор C1 – навантаження – джерело живлення (табл. 2, п. 1). Конденсатор C2 заряджається за ланцюгом: джерело живлення – дросель L1 – діод D1 – конденсатор C2 – джерело живлення. На другому етапі за комутації силових ключів у режимі «пробою» відбувається розряд конденсаторів та передача енергії до дроселів (табл. 2, п. 2). Джерело сталого струму при цьому

не відключається від індуктивного ланцюга. На третьому етапі за стандартної комутації ключів енергія, накопичена в дроселі, передається в навантаження (табл. 2, п. 3).

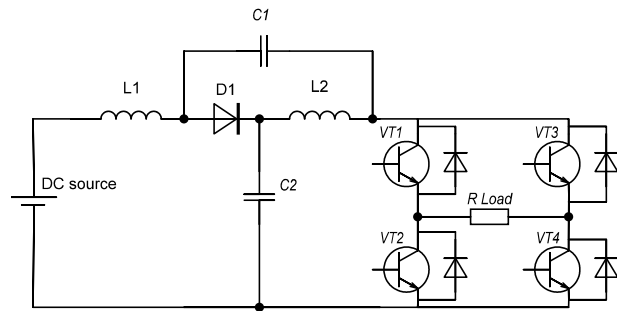


Рис. 2. Інвертор із квазі-імпедансним джерелом

З метою поєднання переваг властивих квазі-імпедансним та багаторівневим інверторам, а саме: можливості роботи у режимі «пробою» та низький коефіцієнт нелінійних спотворень відповідно,

Таблиця 1

Еквівалентні схеми станів Z-інвертора

N	Стан	Схема
1	Стандартний режим комутації ключів	
2	Режим «пробою»	
3	Стандартний режим комутації ключів після стану пробою	

Позначення : - струм джерела; - струм конденсаторів; - струм індуктивностей.

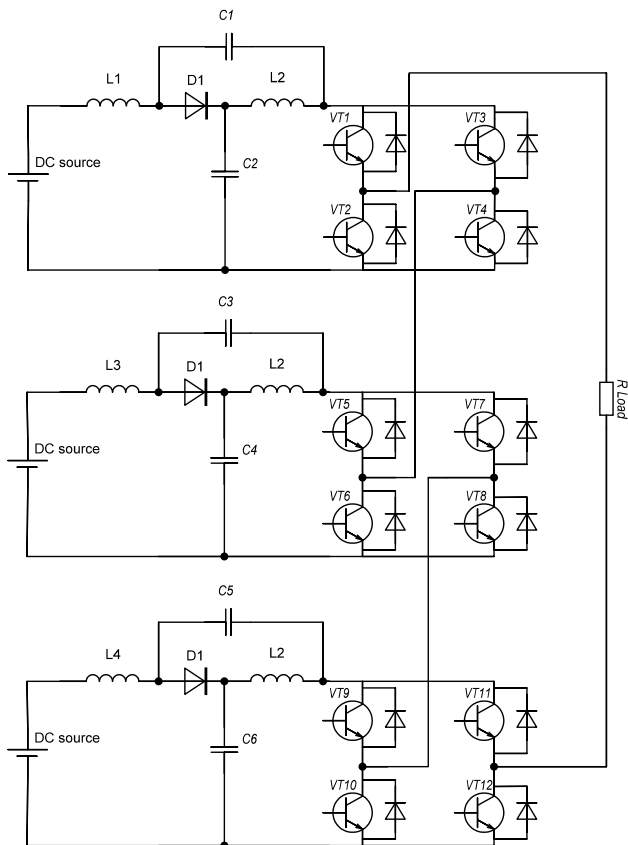


Рис. 3. Трирівневий квазі-мпедансний інвертор

було створено схему каскадного багаторівневого інвертора з комірками на основі квазі-імпедансної топології. Схема трирівневого QZMLI показана на рис. 3.

З метою визначення коефіцієнта нелінійних спотворень багаторівневого квазі-імпедансного інвертора було проведено моделювання трирівневого квазі-імпедансного інвертора в середовищі Matlab Simulink із заданою амплітудою вихідної напруги 260 В та частотою 60 Гц. Спектр вихідної напруги з отриманими результатами коефіцієнта нелінійних спотворень наведено на рис. 4.

**Порівняльні характеристики інверторів** розглянутих типів інверторів зведено в таблиці 3.

**Висновки.** Використання Z та QZ-інверторів у системах електроживлення з відновлювальними джерелами енергії дає змогу вирішити проблеми зменшення вихідної напруги вітрогенератора або сонячної панелі внаслідок несприятливих зовнішніх умов, оскільки ці типи інверторів можуть збільшувати вхідні струм та напругу інверторів без встановлення додаткових перетворювачів.

Використання режиму «пробою» у точці відбору максимальної потужності дає змогу передати максимальну потужність сонячної батареї до навантаження, що, своєю чергою, дозволяє максимально раціонально використовувати площу сонячної батареї.

Дослідження інверторів з імпедансним та квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі показали, що топологія QZ-інвертора додатково дає змогу зменшити кількість елементів схеми, що призводить до зменшення масогабаритних параметрів схеми, нижчих навантажень на компоненти та спрощених методів керування. Так, напруга кон-

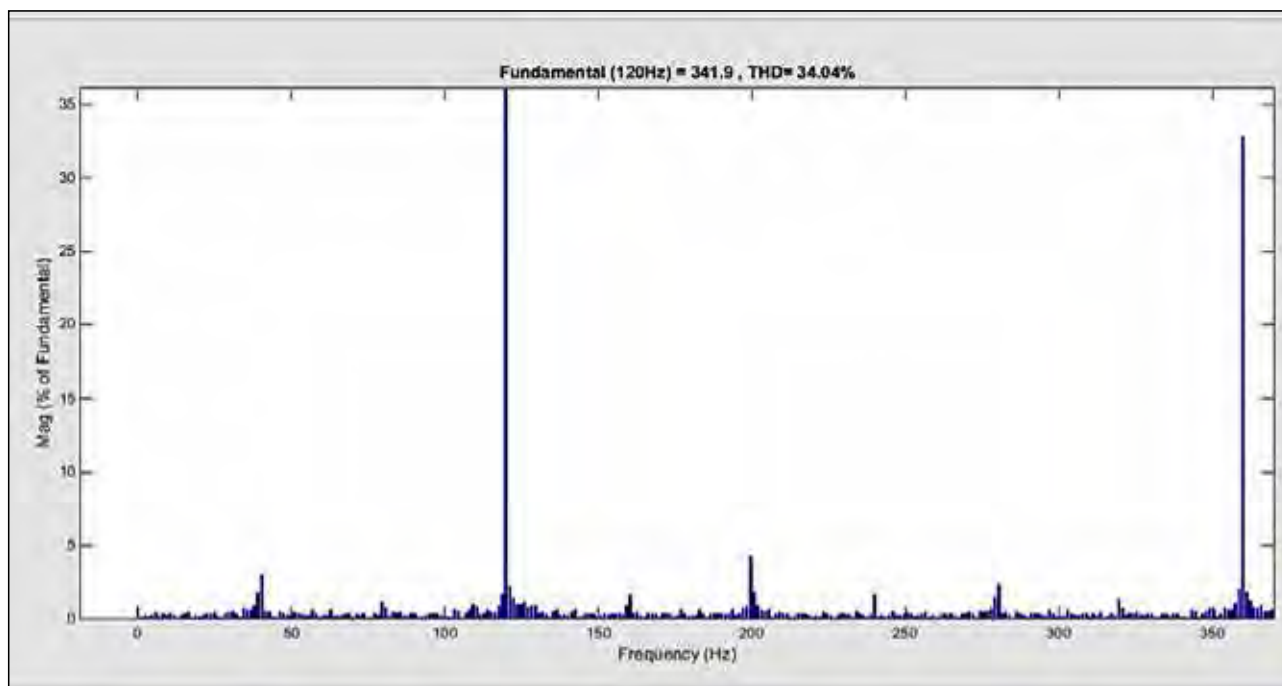


Рис. 4. Спектр вихідної напруги

Еквівалентні схеми станів QZ-інвертора

N	Стан	Схема
1	Стандартний режим комутації ключів	
2	Режим «пробою»	
3	Стандартний режим комутації ключів після стану пробою	

Позначення струмів аналогічно табл. 1.

Багаторівневий квазі-м'єданий інвертор (QZMLI – QZ Multilevel Inverter).

Таблиця 3

Переваги і недоліки схем інверторів

Топологія	Переваги	Недоліки	Сфери застосування	THD
Інвертор напруги Z-типу	Можливість використання «пробивного» стану, що дає змогу оптимізувати передачу потужності від сонячних батарей	Перевантаження ключів схеми за використання режиму «пробою»; необхідність відключення джерела сталого струму за використання режиму «пробою»	Електропривід, системи з фотогенераторами, вітроенергетика	80,81%
QZ-інвертор	Можливість використання «пробивного» стану; менше навантаження конденсаторів; менші габарити перетворювача; можливість неперервної передачі енергії від джерела сталого струму	При роботі на мале навантаження, перетворювачі переходять у режим переривчастого вхідного струму, що призводить до неконтрольованого наростання напруги в ланцюгу сталого струму	Перетворювачі для паливних елементів; сонячні панелі; вітрогенератори; перетворювачі з корекцією коефіцієнта потужності	44,34%
Каскадний QZMLI	Переваги QZ-інверторів; нижчий рівень THD вихідної напруги; можливість підвищення амплітуди вихідної напруги, що дозволяє використовувати джерела сталого струму з меншим значенням вихідного сигналу	Ускладнена будова системи керування відносно звичайного багаторівневого інвертора; високі масогабаритні параметри перетворювачів, створених за цією топологією	Вітрогенератори; сонячні панелі; перетворювачі для живлення асинхронних двигунів	34,04%

денсаторів квазі-імпедансного ланцюга нижча, ніж у випадку інвертора з Z-джерелом.

З метою зменшення значення THD запропоновано схему каскадного багаторівневого інвертора

на базі комірок мостових QZ-інверторів. Показано, що така структура забезпечує зменшення THD при зберіганні високих характеристик QZ-інвертора.

#### Список літератури:

1. Жуйков В.Я., Рогаль В.В., Будьоний О.В. та ін. Енергетична електроніка. Київ, 2008. URL: [http://kaf-pe.kpi.ua/?page\\_id=675](http://kaf-pe.kpi.ua/?page_id=675) (дата звернення: 05.02.2019).
2. Шонин О.Б., Салов Р.А. Динамические свойства Z-инвертора в составе частотно-регулируемого электропривода. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 6. С. 73–81.
3. Liivik L. Semiconductor Power Loss Reduction and Efficiency Improvement Techniques for the Galvanically Isolated Quasi-Z-Source DC-DC Converters. 2015. URL: <https://digi.lib.ttu.ee/i/?2519> (дата звернення: 05.02.2019).
4. Umarani D., Seyezhai Dr.R. A comparative study of conventional and quasi Z-source multilevel inverter for photovoltaic applications. *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ)*. 2015. Vol. 4. № 2. P. 143–154.
5. Макаров В.Г., Хайбрахманов Р.Н. Многоуровневые инверторы напряжения. Обзор топологий и применение. *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 22. С. 134–138. ISSN: 1998-7072.
6. Hanif M., Basu Malabika, Gaughan K. Understanding the operation of a Z-source inverter for photovoltaic application with a design example. *Power Electronics, IET*. 2011. Vol. 4. P. 278–287. URL: [https://www.researchgate.net/publication/224234061\\_Understanding\\_the\\_operation\\_of\\_a\\_Z-source\\_inverter\\_for\\_photovoltaic\\_application\\_with\\_a\\_design\\_example](https://www.researchgate.net/publication/224234061_Understanding_the_operation_of_a_Z-source_inverter_for_photovoltaic_application_with_a_design_example) (дата звернення: 05.02.2019).
7. Тюфанова А.А. Сравнительный анализ характеристик традиционного автономного инвертора напряжения с DC-DC преобразователем с квази-импедансным инвертором для системы электроснабжения службы управления движением судов. *Технические науки: традиции и инновации* : материалы III междунар. науч. конф., г. Казань, март 2018 г. Казань : Молодой ученый, 2018. С. 76–83. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/287/13788/> (дата обращения: 24.01.2019).

#### АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

*Рассмотрены особенности применения автономных инверторов в системах электропитания с возобновляемыми источниками энергии. Рассмотрены топологии и принципы работы инверторов с импедансным и квази-импедансным звеньями во входной цепи. Исследован каскадный многоуровневый инвертор с использованием квази-Z инверторов в качестве ячеек. На основании проведенного моделирования и данных, указанных в литературе, приведены коэффициенты нелинейности выходного напряжения, определены преимущества и недостатки каждой из схем инверторов и даны рекомендации по их применению.*

**Ключевые слова:** автономный инвертор, Z-инвертор, преобразователь с квази-импедансным звеном.

#### AUTONOMOUS INVERTERS IN POWER SUPPLY SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

*The features of the use of autonomous inverters in power supply systems with renewable energy sources are considered. Topologies and principles of operation of inverters with impedance and quasi-impedance links in the input circuit are considered. A cascade multi-level inverter was investigated using quasi-Z inverters as cells. On the basis of the conducted modeling and the data indicated in the literature, the nonlinearity coefficients of the output voltage are given, the advantages and disadvantages of each of the inverter circuits are determined, and recommendations on their use are given.*

**Key words:** autonomous inverter, Z-inverter, converter with quasi-impedance link.

УДК 628.144.2:62-824

**Шмельов Ю.М.**

Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету

**Чорна В.О.**

Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету

**Мельник О.Є.**

ДВНЗ «Криворізький національний університет»

**Харитонов О.С.**

ДВНЗ «Криворізький національний університет»

**Ляхова О.В.**

Політехнічний коледж ДВНЗ «Криворізький національний університет»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ НА РЕСУРС ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

*Розглянуто найбільш значущі причини передчасного виходу з ладу тягових електричних двигунів промислових електровозів. Проведено аналіз залежності терміну служби ізоляції двигуна від перевищення температури ізоляції певного класу вище допустимих значень. З урахуванням місць пошкодження двигунів складена математична модель для досліджень ступеня впливу навантаження і температурного чинника на тяговий двигун промислового електротехнічного комплексу. Проведені дослідження показали, що найбільш уразливим вузлом тягового двигуна є обмотка якоря. Моделювання показало, що зміна струму двигуна і ступеня нагріву його обмоток впливають на зниження терміну служби двигуна, причому значною мірою якірної обмотки. Підвищення швидкості обертання валу двигуна збільшує вібрацію, яка впливає на механічну частину двигуна.*

**Ключові слова:** тяговий двигун, якір, температура, ресурс, ізоляція, моделювання.

**Постановка проблеми.** Електротехнічний комплекс (ЕТК) тягового рухомого складу гірничодобувних підприємств складається зі значної кількості взаємопов'язаних та взаємозалежних елементів. Працездатність будь-якого з компонентів впливає на режими функціонування та рівень надійності всього комплексу. Навіть незначні відхилення параметрів електрообладнання можуть стати причиною порушень режимів роботи електротехнічного комплексу, що відіб'ється на ході технологічного процесу видобутку корисних копалин.

Найбільш навантаженою та водночас найбільш вразливою складовою частиною електротехнічного комплексу є тягові двигуни [1]. Від надійності тягових електричних двигунів (далі – ТЕД) залежить ефективність функціонування всього комплексу.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У роботі В.О. Чорної [1] представлені результати аналізу причин відмов ТЕД, з яких видно, що низька тепловіддача двигунів «закритого» типу викликає перегрів обмотки якоря, тобто є основною причиною виходу їх з ладу.

У статті Р.М. Девлікамова [2] представлені результати досліджень надійності колекторно-щіткового вузла ТЕД постійного струму магістрального електрорухомого складу та способи її підвищення.

А.С. Космодам'янським [3] запропонована математична модель системи охолодження ТЕД постійного струму локомотива.

У роботі «Надежность тягового подвижного состава» [4] наведені результати досліджень надійності ТЕД магістральних електровозів, що свідчать про вплив температури та швидкості нагріву ізоляції на пробій ізоляції обмотки двигуна.

**Постановка завдання.** Мета статті – дослідження на математичній моделі впливу зміни температури нагріву обмоток та навантаження на ресурс тягового електричного двигуна.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Великі навантаження та часті пуски ТЕД ЕТК призводять до нагрівання якірних обмоток і теплового руйнування ізоляції. Нерівномірність розподілу повітря всередині двигуна, розбіжність швидкісних

характеристик двигунів ЕТК, що паралельно працюють, призводять до нерівномірного перегріву обмоток якоря і полюсних котушок [5].

У разі перевищення допустимої температури обмоток ТЕД, їх ізоляція стає жорсткою і крихкою, і значною мірою втрачає електричну міцність. Якщо обмотки перегріваються, летючі речовини з ізоляційних матеріалів швидко випаровуються, що призводить до утворення тріщин, розшарувань і пористості.

Однією з основних особливостей теплових перехідних процесів в електричних машинах є їхня інерційність, що виражається в значному відставанні змін температури від електромеханічних перехідних процесів. Завдяки цьому машини можуть витримувати протягом деякого часу вплив перевантажень, струмів короткого замикання та інших нештатних режимів. Облік теплової інерційності в розрахунках нестационарного нагріву є обов'язковою умовою достовірності результатів [6].

Підвищена температура обмоток викликає теплове старіння ізоляції, що приводить до необоротного зниження електричної і механічної міцності. Задля оцінки впливу підвищеної температури на термін служби ізоляції двигуна використовується правило Монтзингера [7]:

$$D_{\vartheta} = A_0 2^{-\vartheta/\Delta\vartheta}, \quad (1)$$

де  $A_0$  – термін служби ізоляції певного класу при постійній температурі  $\vartheta$  (°C), років;  $\Delta\vartheta$  – постійна величина збільшення температури, при якій термін служби ТЕД зменшується вдвічі.

Згідно з правилом Монтзингера,  $\Delta\vartheta = 5 \dots 10^\circ\text{C}$ , а при  $\Delta\vartheta = 8^\circ\text{C}$  формула (1) приймає вигляд:

$$D_{\vartheta} = A_0 2^{-\vartheta/\Delta\vartheta} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{8}\vartheta} = A_0 e^{-0,0866\vartheta}.$$

У графічному вигляді для ізоляції класу F, яка характерна для ТЕД постійного струму ЕТК рухомого складу, ця залежність представляється кривою, зображеною на рис. 1.

З рисунку видно, що підвищення температури з 130 до 138°C спричиняє скорочення терміну її служби з 16 до 8 років, а нагрів до 155°C – до двох років. В основі цього явища лежить загальний закон залежності швидкості хімічних реакцій від температури, описуваний рівнянням Вант-Гоффа [8].

Слід зазначити, що це правило недоцільно використовувати в межах низьких температур через те, що при температурі 90°C і нижче старіння ізоляції відбувається в основному не через хімічні перетворення, а з інших причин, як-от вібрація тощо [6].

Серед наявних засобів та методів оцінки технічного стану електричних двигунів більшість базується на визначенні стану ізоляції обмоток. Діагностування тягового двигуна доцільно здійснювати за станом ізоляції головних полюсів та обмоток якоря.

Рівняння, що описує залежність терміну служби ізоляції, має такий вигляд:

$$R = L_{0я} 2^{-\frac{\vartheta}{\Delta\vartheta_я}} + L_{0п} 2^{-\frac{\vartheta}{\Delta\vartheta_п}} + L_B 2^{-\frac{L}{L_0}}, \quad (2)$$

де  $R$  – термін служби ізоляції при незмінній температурі;

$L_{0я}, L_{0п}$  – термін служби ізоляції обмоток якоря та головних полюсів при навколишній температурі 20°C;

$L_B$  – термін служби машини щодо вібрації;

$\vartheta$  – встановлена незмінна підтримувана температура;

$\Delta\vartheta_я, \Delta\vartheta_п$  – постійна величина збільшення температури, при якій термін служби ізоляції обмотки якоря та полюсів зменшується вдвічі;

$L$  – віброприскорення;

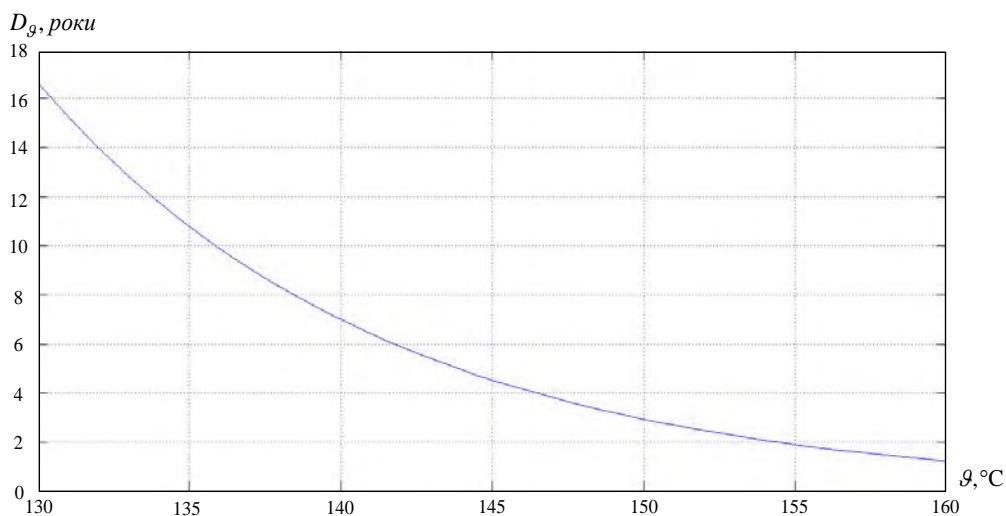


Рис. 1. Залежність терміну служби ізоляції від температури



$L_0$  – постійна величина віброприскорення [9; 10].

Перегрів якоря визначається таким виразом [7]:

$$\Delta\vartheta_{\text{я}} = \vartheta'_n + \vartheta'_{\text{в.п.}} - \vartheta_{\text{кл.із.}} \quad (3)$$

де  $\vartheta'_n$  – температура перегріву міді обмотки якоря;

$\vartheta'_{\text{в.п.}}$  – температура вентилязованого повітря;

$\vartheta_{\text{кл.із.}}$  – температура перегріву відповідного класу ізоляції.

Перегрів полюсів розраховується за виразом [7]:

$$\Delta\vartheta_n = \vartheta''_n + \vartheta_{\text{в.п.}} - \vartheta_{\text{н.с.}} \quad (4)$$

де  $\vartheta''_n$  – температура перегріву міді обмотки полюсів.

Базові параметри для визначення перегріву якоря та полюсів є конструктивними параметрами

двигуна, які визначається згідно з працею «Проектирование электрических машин» [11].

Об'єктом дослідження було вибрано ТЕД типу ДТН-45 із потужністю годинного режиму 45 кВт. Дослідження ресурсу двигуна проводиться на математичній моделі, структурна схема якої показана на рис. 2, виконаній у програмному пакеті «Mathlab». Математична модель складається з таких блоків: визначення втрат на перемагнічування та перегрів (Subsystem), частоти та тепловіддачі (Subsystem 3), ресурсу якоря (Subsystem 4), ресурсу полюсів (Subsystem 5), вібрації (Subsystem 6).

Під час моделювання не було враховано вплив запиленості, якості попередньо проведених ремонтів та деяких інших зовнішніх факторів на ресурс ТЕД.

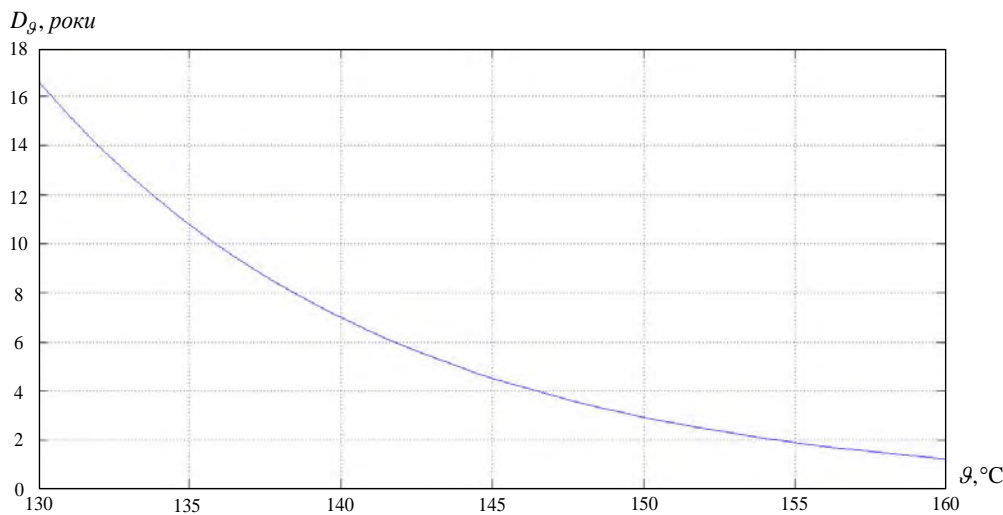


Рис. 2. Структурна схема математичної моделі визначення залишкового ресурсу тягового електродвигуна

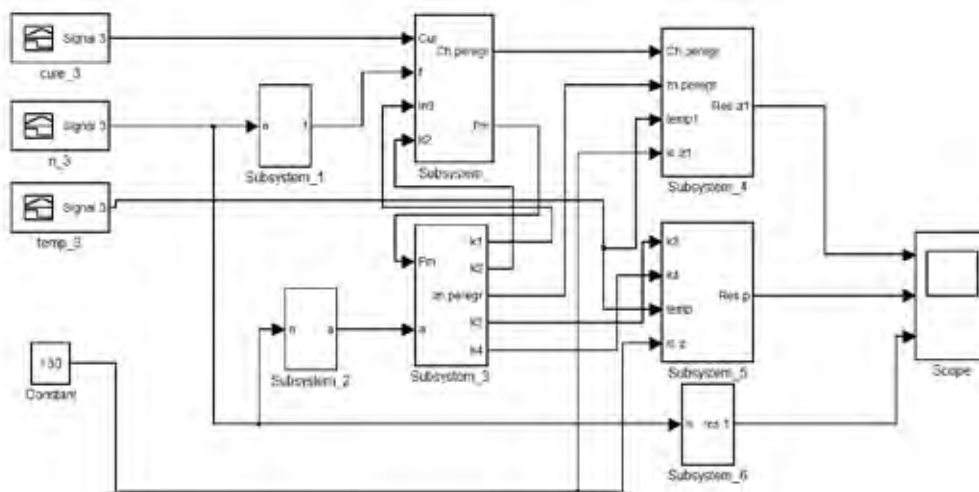


Рис. 3. Залежність ресурсу якоря, полюсів та вібрації від температури

На рисунках 3–5 представлені отримані залежності ресурсу двигуна від температури обмоток, струму, вібрації.

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що при підвищенні температури обмоток та струму двигуна ресурс ізоляції якоря та головних полюсів зменшується з різною інтенсивністю, що в подальшому призводить до виходу їх із ладу через термічне старіння ізоляції, що викликає її пробій. Якщо підвищуються оберти двигуна, збільшується вібрація, яка безпосередньо впливає на надійність підшипникового, колекторно-щіткового вузлів та інших механічних складників двигуна.

Отримані дані дають змогу дійти таких висновків. При збільшенні температури обмоток на 80С порівняно максимально допустимої величини для цього класу ізоляції ресурс якоря знижується в 2,5 раза, а полюсів – в 1,5 раза. Збільшення температури спричиняє зменшення ресурсу двигуна, при цьому ресурс якоря зменшується суттєвіше, ніж полюсів. У разі перевищення температури обмоток на 350С термін служби якоря зменшується майже в 7 разів щодо нормального режиму функціонування.

При збільшенні струму двигуна порівняно номінальної величини спостерігається значне зменшення ресурсу якоря та полюсів. Так, зі збільшенням струму на 5,5% термін служби якоря зменшується в 4 рази, а полюсів – в 2 рази. При збільшенні струму на 12% ресурс якоря та полюсів зменшується, відповідно, в 8,5 та 4 рази.

Як свідчать результати моделювання, зміна жодного з досліджуваних параметрів не впливає суттєво на рівень вібрації. Максимальна зміна вібрації, що зареєстрована в результаті моделювання, становить 1,5% у разі збільшення кількості обертів двигуна на 5%.

Таким чином, можна узагальнити результати досліджень: ресурс обмоток якоря та полюсів двигуна зменшується при збільшенні струму швидше, аніж при збільшенні самої температури. Також із графіків видно, що найбільш вразливим вузлом двигуна є обмотка якоря.

#### Висновки.

1. У процесі аналізу результатів попередніх досліджень встановлені причини виходу з ладу ТЕД ЕТК.

2. Проаналізована методика оцінки ресурсу ізоляції ТЕД та на її основі розроблена математична

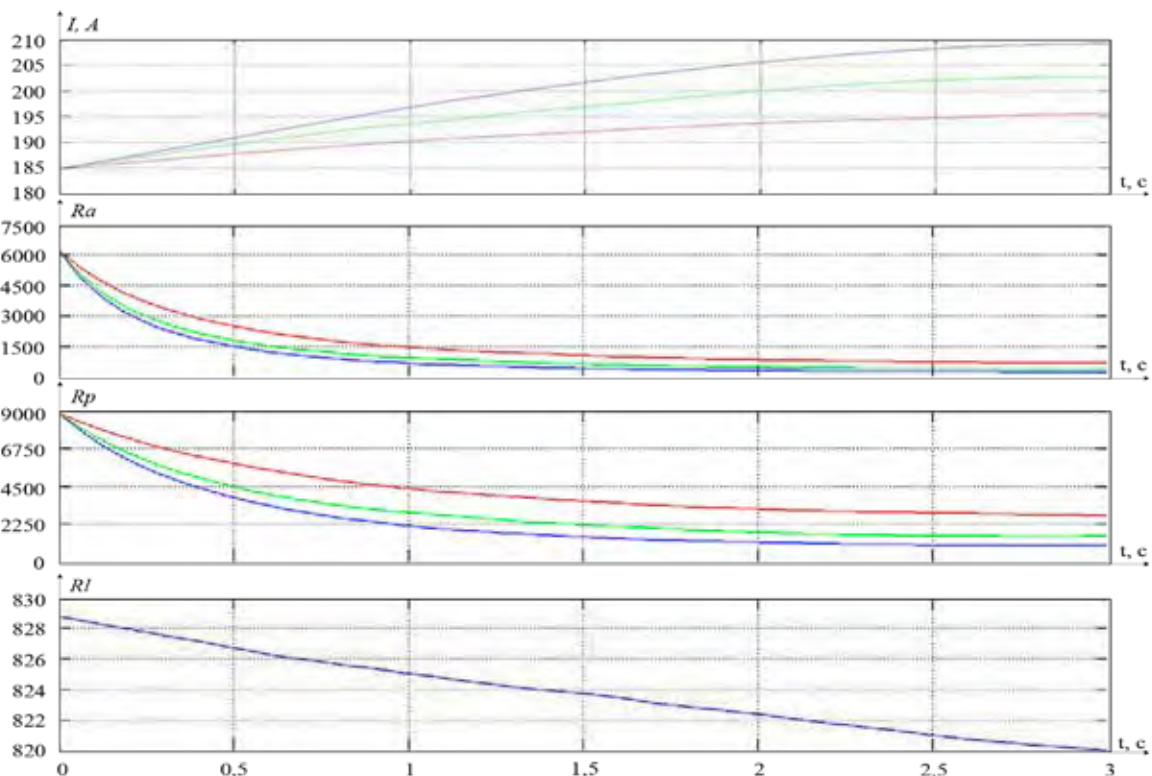


Рис. 4. Залежність ресурсу якоря, полюсів та вібрації від струму двигуна

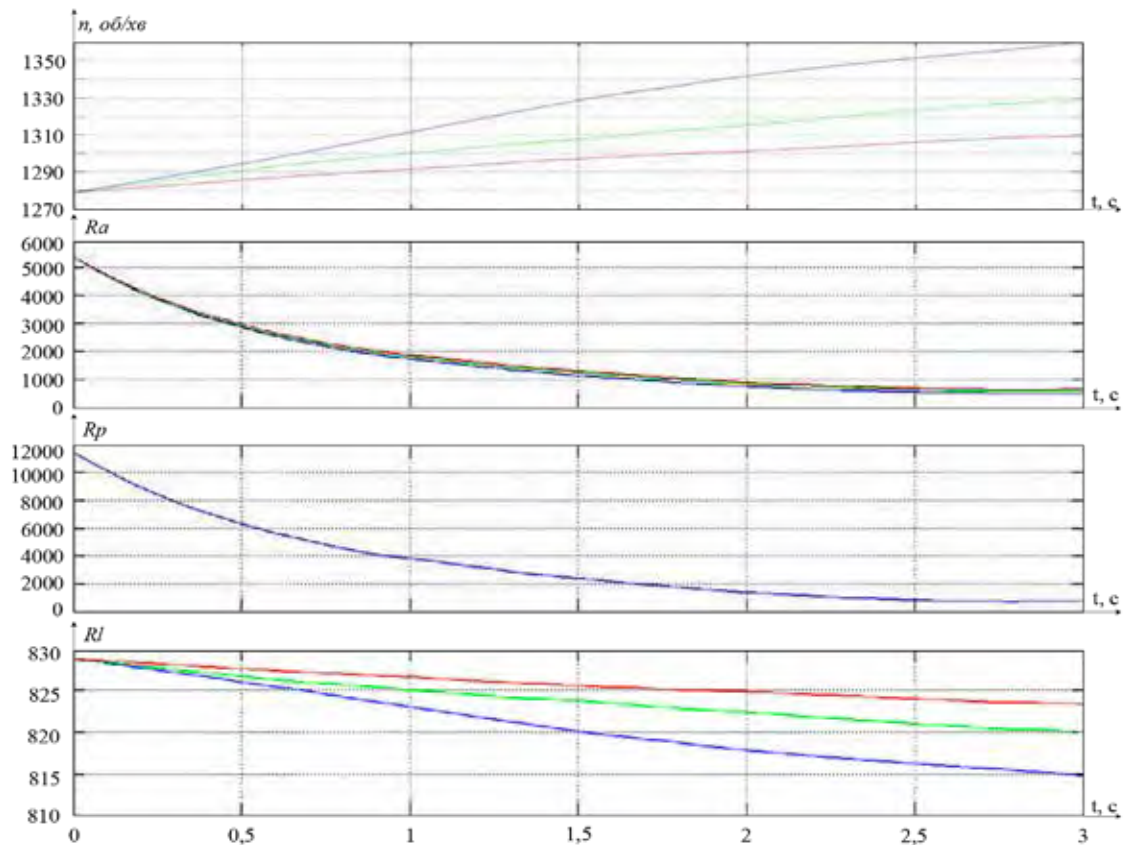


Рис. 5. Залежність ресурсу якоря, полюсів та вібрації від швидкості обертання двигуна

модель для досліджень залишкового ресурсу двигуна при зміні температури обмоток та навантаження.

3. Результати моделювання свідчать про те, що найбільш вразливим елементом тягового двигуна постійного струму є обмотка якоря, вплив високих струмів та температури значно скорочує ресурс цього вузла. У разі збільшення темпера-

тури обмоток на  $80^{\circ}\text{C}$  вдвічі знижується ресурс якоря. У разі збільшення струму на 12% термін служби обмотки якоря зменшується в 8 разів.

4. Відхилення температури повітря та струму двигуна від номінального значення найменше впливає на вібрацію. Підвищена вібрація спостерігається у разі збільшення частоти обертів вала двигуна.

#### Список літератури:

1. Черная В.О. К вопросу анализа поврежденных тяговых двигателей шахтных электровозов. *Молодь : наука та інновації* : праці 1 Всеукр. наук.-техн. конф., Дніпропетровськ, 3–4 грудня 2013 р. Дніпропетровськ, 2013. С. 421–422.
2. Девликамов Р.М. Прогнозирование искрения в щеточном контакте коллекторной электрической машины и оценка ее коммутационной надежности. *Известия Вузов. Электромеханика*. 2007. № 1. С. 20–22.
3. Космодамианский А.С. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов : автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.22.07. Москва, 2002. 36 с.
4. Надежность тягового подвижного состава. *Региональный центр инновационных технологий*. URL: <http://rcit.su/techinfoD9.html> (дата звернення: 23.03.2019).
5. Куздецов Н.Л. Надійність електричних машин: навч. посібник. Москва: МЕІ, 2006. 432 с.
6. Мокін Б.І., Розводюк М.П. Математичні моделі та системи технічної діагностики основних електротехнічних систем міських трамваїв : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 126 с.
7. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. Москва – Ленинград : Госэнегроиздат, 1961. 264 с.

8. Киреев В.А. Курс физической химии. Москва : Химия, 1975. 776 с.
9. Иоффе А.Б. Тяговые электрические машины. Москва, 1967. 248 с.
10. Тюков В.А., Честюнина Т.В., Бухгольц Ю.Г. Теплопередача, вентиляционные и тепловые расчеты в электромеханике : учебное пособие. Новосибирск : НГТУ, 2013. 248 с.
11. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. Москва : Высшая школа, 2005. 767 с.

#### **ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НА РЕСУРС ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Рассмотрены наиболее значимые причины преждевременного выхода из строя тяговых электрических двигателей промышленных электровозов. Проведен анализ зависимости срока службы изоляции двигателя от превышения температуры изоляции определенного класса выше допустимых значений. С учетом мест повреждений двигателей составлена математическая модель для исследований степени влияния нагрузки и температурного фактора на тяговый двигатель промышленного электротехнического комплекса. Проведенные исследования показали, что наиболее уязвимым узлом тягового двигателя является обмотка якоря. Моделирование показало, что изменение тока двигателя и степени нагрева его обмоток влияют на снижение срока службы двигателя, причем в значительной степени якорной обмотки. Повышение скорости вращения вала двигателя увеличивает вибрацию, которая оказывает влияние на механическую часть двигателя.*

**Ключевые слова:** тяговый двигатель, якорь, температура, ресурс, изоляция, моделирование.

#### **RESEARCH INFLUENCE OF OPERATING MODES ON THE RESOURCE OF THE ELECTRIC DRIVE ENGINE**

*The most significant reasons for the premature failure of traction electric engines of industrial electric locomotives are considered. The analysis of the service life of the insulation of the engine from the temperature of the insulation of a certain class above the permissible values. Taking into account the places of engine damage, a mathematical model has been compiled for studying the degree of influence of the load and temperature factor on the traction engine of an industrial electrical complex. Studies have shown that the most vulnerable node of the traction motor is the armature winding. Simulations has shown that a change in the motor current and the degree of heating of its windings affect the reduction of the service life of the motor, with a significant degree of anchor winding. Increasing the speed of rotation of the motor shaft increases vibration, which affects the mechanical part of the engine.*

**Key words:** traction motor, rotor temperature, resource, insulation, simulation.

# РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 004.7:654.195.6

*Інь Ченлян*

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

*Лазебний В.С.*

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

## ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ IEEE 802.11 НА ПІДГРУНТІ КОНЦЕПЦІЇ ВІРТУАЛЬНОГО КОНКУРЕНТНОГО ВІКНА

*У статті наведено обґрунтування розрахункових співвідношень для визначення експлуатаційних характеристик безпроводової мережі передавання даних стандарту IEEE 802.11, що функціонує в режимі конкурентного доступу до середовища передавання. Розрахункові співвідношення отримано на підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна, що є альтернативою концепції часового слоту. Застосування концепції віртуального конкурентного вікна дало змогу пов'язати системні параметри, експлуатаційні характеристики та показники якості безпроводової мережі. Наведено співвідношення для визначення ймовірності колізій та успішного передавання кадрів даних, для визначення кількості колізій та кількості вільних часових слотів залежно від кількості активних станцій, що конкурують за доступ до каналу, а також співвідношення для визначення середньої затримки передавання кадру та нерівномірності затримки. Отримані співвідношення дадуть змогу більш точно оцінювати та прогнозувати експлуатаційні показники на етапі проектування та експлуатації безпроводових мереж стандарту 802.11.*

**Ключові слова:** безпроводова мережа, затримка передавання, колізія, конкурентний доступ, насичений режим, пропускна спроможність.

**Постановка проблеми.** Базовою технологією доступу до радіоканалу в мережах усіх специфікацій стандарту 802.11 є технологія конкурентного доступу, яку реалізовано із застосуванням розподіленої функції координації (DCF) безпосередньо або з використанням алгоритму RTS/CTS, за якого кожен вузол мережі перед тим як надіслати дані «в ефір», спочатку надсилає спеціальне коротке повідомлення, яке називається RTS (Ready To Send) і означає готовність цього вузла до відправлення даних. У відповідь станція-адресат надсилає відповідь готовності прийняти кадр – CTS (Clear To Send), а всі інші станції, що «чули» кадри RTS та CTS, утримуються від передавання на час, зазначений у цих кадрах.

Алгоритм RTS/CTS був істотно вдосконалений для використання в мережах, що функціонують за специфікаціями 802.11n та 802.11ac, але основний принцип під час передавання кадру RTS – принцип конкурентного доступу до середовища – залишився [1, с. 341; 2, с. 3].

Хоча у пізніх версіях стандарту 802.11 застосовано додаткові механізми для зменшення ймовірності колізій у мережі з великою кількістю активних станцій, але загроза виникнення колізій залишається, а за умови значного поширення безпроводових мереж є неминучою.

Поширені розрахункові співвідношення, що ґрунтуються на концепції часового слоту, дають змогу адекватно визначити експлуатаційні характеристики безпроводової мережі тільки у разі малої ймовірності виникнення колізій у каналі передавання [3, с. 5]. У сучасних мережах здебільшого одночасно функціонує багато станцій, що призводить до збільшення ймовірності колізій та їхнього впливу на експлуатаційні характеристики. Для потреб проектування безпроводових мереж IEEE 802.11 і прогнозування характеристик наявних мереж є необхідність у комплексі розрахункових співвідношень, що дають можливість зробити відповідні розрахунки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробленню моделей каналу присвячено багато робіт, зокрема в роботах [2, с. 7; 3, с. 5; 4, с. 124] запропоновано моделі, в яких ураховано базові принципи функціонування мереж стандарту 802.11. Як правило, їх адаптовано до певних умов функціонування мережі. Класичним підходом до аналізу мереж стандарту 802.11 вважають підхід, запропонований Джузеппе Біанкі [3, с. 5] і підтриманий іншими дослідниками, який полягає у використанні поняття «насиченої пропускної здатності» та «насиченого навантаження» станції та мережі у цілому [4, с. 121]. Розрахунки всіх параметрів здійснюють на підґрунті концепції часового слота.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – отримати розрахункові співвідношення для визначення пропускної здатності безпроводової мережі та інших експлуатаційних характеристик мережі із застосуванням концепції віртуального конкурентного вікна з урахуванням кількості активних станцій мережі з насиченим навантаженням.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У мережах стандарту IEEE 802.11 конкурентний доступ реалізовано із застосуванням технології CDMA/CA [1, с. 328; 6, с. 851]. Для здійснення доступу до каналу кожна станція завантажує в лічильник зворотного відліку число з початкової множини  $\{0, 1, 2, \dots, CW_{\min}\}$ . Станції прослуховують спільне середовище передавання і, якщо воно вільне, здійснюють декремент лічильника через кожен вільний системний інтервал – часовий слот ( $\sigma$ ). Та станція, у якої в результаті декременту в лічильнику зворотного відліку виникає значення «0», починає передавати кадр даних або керування. За описаного алгоритму доступу кілька станцій можуть почати передавати свої кадри одночасно, що призведе до колізії й унеможливить приймання цих кадрів. У режимі конкурентного доступу керування мережею здійснюється із застосуванням розподіленої функції координації – DCF. Щоб не втратити багато часу через колізії, застосовують режим із попереднім обміном короткими кадрами керування – RTS/CTS. У такому разі колізія може мати місце тільки під час передавання кадру RTS. Подібна ситуація виникає у сегменті безпроводової мережі 802.11ac, коли станція, що готується до передавання, надсилає повідомлення з нульовим пакетом даних (NDPA – Null Data Packet Announcement), що містить адреси необхідних вузлів, щоб ініціювати підготовку спільного середовища до передавання кадру [2, с. 6].

**Ймовірність колізії для окремої станції в безпроводовій мережі.** Ймовірність колізій у безпро-

водовій мережі з конкурентним доступом є одним із найважливіших параметрів для визначення пропускної здатності та інших характеристик. Для окремої активної станції в мережі її можна визначити із застосуванням співвідношення [7, с. 32]:

$$p_c = 1 - (1 - p_{c1})^{N-1}, \quad (1)$$

де  $p_{c1} = 1/CW_{\min}$  – ймовірність колізії даної станції з однією з активних станцій безпроводової мережі;

$N$  – кількість активних станцій у мережі;

$CW_{\min}$  – початкове значення конкурентного вікна (у більшості специфікацій IEEE 802.11  $CW_{\min} = 15$ ).

У разі виникнення колізії станції здійснюють спробу повторного передавання, але для цього завантажують у лічильник зворотного відліку число з удвічі більшої множини  $\{0, 1, 2, \dots, (2 \cdot CW_{\min} + 1)\}$ . Така процедура призводить до зменшення кількості станцій, що одночасно конкурують за канал.

Розглянемо сценарій, за якого всі  $N$  станцій починають одночасно конкурувати за канал, тоді протягом першого часового інтервалу, що дорівнює тривалості мінімального конкурентного вікна, кількість станцій, які беруть участь у конкуренції за канал, становитиме  $N_1 = N$ , а ймовірність колізії –  $p_c^{(1)}$ .

Під час другого часового інтервалу для станцій, які потрапили в колізію, конкурентне вікно збільшиться вдвічі, і частина станцій вибере число з першої половини цього збільшеного інтервалу, а інша частина – з другої. Оскільки вибір будь-якого числа зі збільшеного набору чисел для завантаження лічильника зворотного відліку є однаково ймовірним, то в середньому число станцій, які вибрали число з першої половини конкурентного вікна та з другої половини, буде однаковим. На другій стадії кількість станцій, що конкурують за доступ до каналу, та ймовірність колізії можна визначити співвідношеннями:

$$N_2 = N_1 - 0,5p_c^{(1)}N_1, \quad (2)$$

$$p_c^{(2)} = 1 - (1 - p_{c1})^{N^{(2)}-1}. \quad (3)$$

Деяка кількість станцій (ті станції, що завантажили в лічильники числа з другої половини збільшеного конкурентного вікна), а саме  $0,5p_c^{(1)}N_1$ , не братиме участі в конкуренції за доступ до каналу на другій стадії.

На третій стадії кількість станцій і ймовірність колізії будуть визначатися співвідношеннями:

$$N_3 = N_2 - 0,5p_c^{(2)}N_2 + 0,5p_c^{(1)}N_1, \quad (4)$$

$$p_c^{(3)} = 1 - (1 - p_{c1})^{N^{(3)}-1}. \quad (5)$$

Другий доданок у (4) враховує станції, що після колізії на першій стадії завантажили в лічильники числа з другої половини збільшеної множини.

Оскільки ймовірність потрапити в колізію кілька разів поспіль набагато менше, ніж одноразова колізія, і з урахуванням того, що після успішного передавання кадру даних станція повертається в стан першої стадії, для четвертої та наступних стадій можна застосувати співвідношення, аналогічні (4) і (5), для визначення кількості станцій, що конкурують за доступ до каналу, та ймовірності виникнення колізії. Нижче наведено графіки зміни кількості станцій мережі, що конкурують за доступ до каналу (рис. 1), та ймовірності колізій (рис. 2) залежно від того, на якій стадії перебуває безпроводова мережа і скільки активних абонентів ( $N$ ) є в мережі.

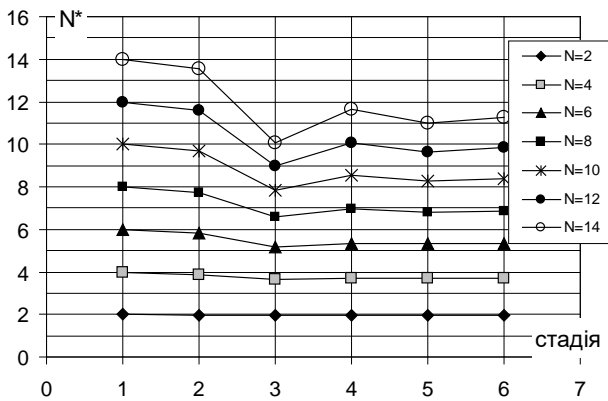


Рис. 1. Зміна кількості станцій, що конкурують за канал, у процесі встановлення квазістаціонарного режиму

Як видно з наведених графіків, через виникнення колізій число станцій, які конкурують за доступ до радіоканалу, менше загального числа активних станцій у мережі, і після початку функціонування мережі це число стає постійним уже після кількох умовних стадій доступу до каналу. Кількість станцій, що конкурують за доступ до каналу  $N^*$ , залежить від мінімального значення конкурентного вікна  $CW_{min}$  і кількості активних станцій  $N$ .

Графік зміни кількості станцій  $N^*$ , що одночасно конкурують за доступ до каналу в безпроводовій мережі з  $N$  активними станціями в насиченому режимі, наведено на рис. 3.

Графіки на рис. 1 та рис. 2 ілюструють процес установа квазістаціонарного режиму в безпроводовій мережі з насиченим навантаженням у разі тривалої активності  $N$  станцій.

Якщо час функціонування насиченої мережі перевищує час, необхідний для реалізації шести стадій доступу, то кількість станцій, що конкурують за доступ до каналу, і ймовірність колізії набувають постійного значення. Такий резуль-

тат можна пояснити тим, що кожна станція після успішного передавання кадру даних починає нову спробу від початкового значення конкурентного вікна  $CW_{min}$ .

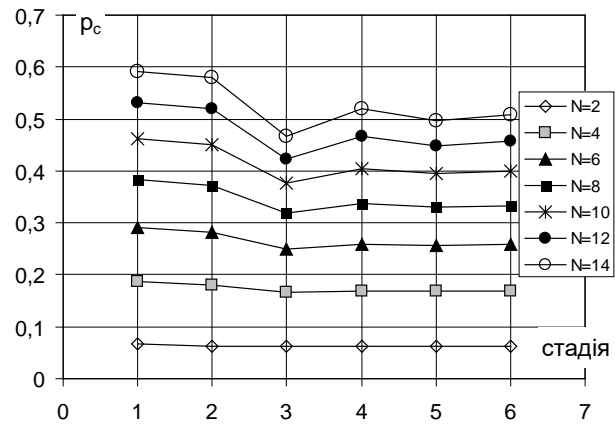


Рис. 2. Графіки зміни ймовірності колізій у процесі встановлення квазістаціонарного режиму

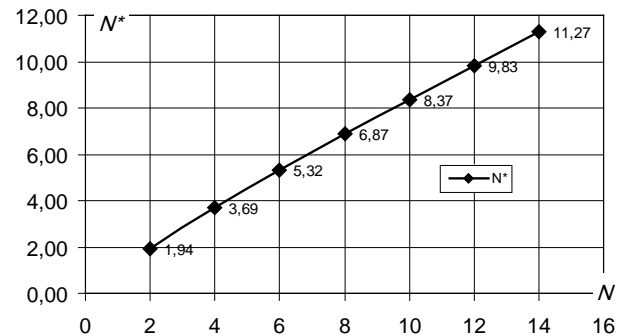


Рис. 3. Залежність кількості конкуруючих станцій  $N^*$  від загальної кількості активних станцій у безпроводовій мережі  $N$

Отже, якщо початкове число активних станцій у безпроводовій мережі ( $N = 14$ ) приблизно дорівнює числовому значенню конкурентного вікна

( $CW_{min} = 15$ ), то в мережі з насиченим навантаженням фактична кількість активних станцій, що конкурують за доступ до каналу, буде приблизно на 19,5% менше загальної кількості станцій ( $N^*=11,27$ ) через застосування двійкового експоненціального закону для зміни конкурентного вікна. Якщо початкове число активних станцій становитиме лише 25% ( $N = 4$ ) від значення мінімального конкурентного вікна, ефективна кількість активних станцій буде на 7,75% менше загальної кількості станцій ( $N^*=3,69$ ).

**Ймовірність успішного передавання кадру даних у безпроводовій мережі з конкурентним доступом.** Розглянемо ймовірність успішного передавання кадру, яка зумовлена тільки процедурою конкурентного доступу до каналу без

урахування можливості анулювання кадру через тривале очікування доступу до каналу. Оскільки в разі виникнення колізії станція буде здійснювати повторну спробу (всього  $R$  спроб) із використанням збільшеного конкурентного вікна, будемо шукати ймовірність успішного передавання  $p_s$  як суму ймовірностей успішного передавання під час усіх можливих послідовних спроб. Урахуємо, що ймовірність колізії  $p_c$  на всіх стадіях доступу в насиченій мережі є величиною постійною.

Під час першої спроби ймовірність успішно передати кадр даних становить  $(1 - p_c)$ . Якщо під час першої спроби сталася колізія, тоді ймовірність того, що кадр буде успішно переданий під час другої спроби, становить  $p_c(1 - p_c)$ , під час третьої –  $p_c^2(1 - p_c)$ . Ймовірність успішного передавання кадру даних знайдемо як повну ймовірність передавання його протягом  $R$  спроб:

$$\begin{aligned}
 P_s &= (1 - p_c) + p_c(1 - p_c) + p_c^2(1 - p_c) \\
 &+ p_c^{i-1}(1 - p_c) + \dots + p_c^{R-1}(1 - p_c) = \\
 &= (1 - p_c)(1 + p_c + p_c^2 + \dots \\
 &+ p_c^{i-1} + \dots + p_c^{R-1}) = 1 - p_c^R
 \end{aligned}
 \quad (6)$$

Графіки зміни ймовірності успішного передавання кадру даних у безпроводовій мережі наведено на рис. 4. Із графіка випливає, що навіть у разі, коли кількість активних станцій становить  $(CW_{\min} - 1)$ , унаслідок застосування механізму повторного передавання ймовірність успішного передавання кадру становить не менше 99%.

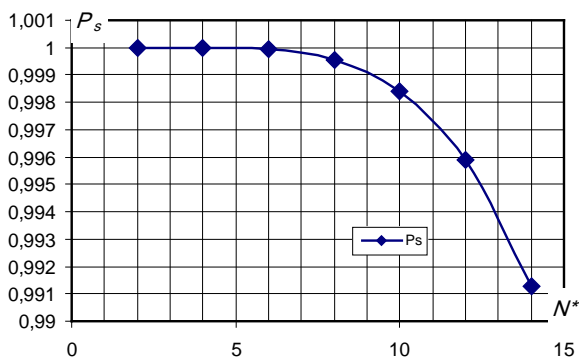


Рис. 4. Залежність ймовірності успішного передавання кадру від кількості станцій із насиченим навантаженням,  $CW_{\min} = 15$

**Ймовірність виникнення колізії у безпроводовій мережі 802.11 за наявності в ній  $N$  активних станцій із насиченим навантаженням.** Ймовірність виникнення колізії у безпроводовій мережі 802.11 за наявності  $N$  активних станцій є важливою характеристикою, яка дає змогу оцінити затримку передавання кадру та нерівномірність цієї затримки, але у попередніх дослідженнях

процесів у безпроводових мережах цю характеристику обходили увагою.

Оцінимо загальну ймовірність виникнення колізії в насиченій мережі 802.11 з конкурентним доступом до радіоканалу. У даному разі йдеться про колізії між будь-якими станціями мережі.

Розглянемо уявний сценарій, за якого всі активні станції мережі знаходяться на першій стадії доступу до радіоканалу і використовують для завантаження лічильника зворотного відліку число з множини  $\{0, 1, 2, \dots, W\}$ . Тобто в нашому разі мінімальне значення конкурентного вікна  $CW_{\min} = W$ . Кількість активних станцій дорівнює  $N$ .

Колізія виникне, якщо дві або більше станцій будуть містити у своїх лічильниках зворотного відліку однакові числа. Для формування розрахункового співвідношення для визначення ймовірності колізії скористаємося загальним підходом теорії ймовірностей. Тобто будемо визначати цю ймовірність як відношення кількості сприятливих подій до кількості всіх можливих подій. Зазначені величини можна визначити із застосуванням формул комбінаторики. Комбінацію всіх чисел, що знаходяться в лічильниках зворотного відліку  $N$  станцій, можна розглядати як розміщення із  $W$  по  $N$ .

Кількість сприятливих подій (що призводять до колізії) знайдемо як різницю кількості розміщень із  $W$  по  $N$  із повторами і кількості розміщень без повторів. Загальну ймовірність колізії  $P_c$  знайдемо як відношення цієї різниці до кількості розміщень із  $W$  по  $N$  із повторами, оскільки саме кількість розміщень із повторами визначає загальну кількість подій. На підставі наведених міркувань можна записати [5, с. 51]:

$$P_c = \frac{\tilde{A}_W^N - A_W^N}{A_W^N} = 1 - \frac{W!}{(W - N)! W^N}, \quad (7)$$

де  $\tilde{A}_W^N = W^N$  – кількість розміщень із  $W$  по  $N$  із повтореннями;  
 $A_W^N = \frac{W!}{(W - N)!}$  – кількість розміщень із  $W$  по  $N$  без повторень.

Графік залежності (7) наведено на рис. 5. Цей графік наглядно ілюструє загрозу виникнення колізій у сегменті безпроводової мережі з  $N$  станціями в насиченому режимі.

Як випливає з наведеного графіка, якщо кількість активних станцій більша за 25% від значення конкурентного вікна  $W$ , ймовірність колізії перевищує 0,33 ( $CW_{\min}=15$ ) і 0,5 ( $CW_{\min}=31$ ). Визначена згідно з (7) ймовірність колізій має місце протягом кожного часового слота, коли станції можуть отримати доступ до радіоканалу. Таким чином, за час, поки всі станції передадуть у середньому по одному кадру, у мережі станеться кілька колізій.



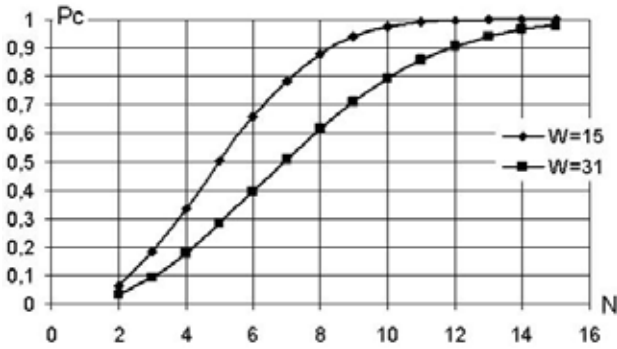


Рис. 5. Графік залежності ймовірності колізії  $P_c$  у безпроводовій мережі з  $N$  активними станціями

**Характеристики віртуального конкурентного вікна.** Згідно з [8, с. 8], віртуальне конкурентне вікно – це деяке усереднене число, що дорівнює кількості вільних часових слотів, відрахованих кожною активною станцією в проміжках між передаванням двох послідовних кадрів у режимі насиченого навантаження.

Знайдемо величину віртуального конкурентного вікна  $VCW$  як значення математичного сподівання для випадку двійкового показникового закону збільшення конкурентного вікна  $CW$  у разі виникнення колізії.

Розглянемо сценарій, за якого станція з насиченим навантаженням безперервно передає кадри даних протягом тривалого часу. За таких умов певні кадри буде передано з першої спроби, якщо колізії не виникне, з другої спроби, якщо під час першої спроби виникне колізія, а також з усіх інших можливих спроб, якщо послідовно буде виникати кілька колізій. Якщо б не було колізій, з урахуванням того, що всі числа для завантаження в лічильник зворотного відліку є однаково ймовірними, станція передавала б кадри даних у середньому через  $\frac{CW_1}{2}$  часових слотів. Ймовірність того, що станція передасть кадр під час першої спроби, за наявності колізій у мережі, дорівнює  $(1 - p_c)$ . Аналогічно, якщо станція під час передавання кадру буде потрапляти один раз у колізію, ймовірність чого  $p_c$ , вона буде в середньому передавати через  $\frac{2CW_1}{2}$  часових слотів. З урахуванням того, що кількість спроб передати кадр даних у разі виникнення колізій становить  $R$ , значення віртуального конкурентного вікна можна визначити як математичне сподівання:

$$VCW = \frac{CW_1}{2}(1 - p_c) + \frac{2CW_1}{2}(1 - p_c)p_c + \frac{4CW_1}{2}(1 - p_c)p_c^2 + \dots + \frac{2^R CW_1}{2}(1 - p_c)p_c^R = \frac{CW_1 \cdot (1 - p_c)}{2} \cdot \sum_{i=1}^{R+1} (2p_c)^{i-1} \quad (8)$$

На рис. 6 наведено графік зміни величини віртуального конкурентного вікна залежно від кількості активних станцій із насиченим навантаженням.

Графік на рис. 6 отримано з урахуванням залежності, наведеної на рис. 2. Кількість вільних часових слотів, які кожній станції в середньому доводиться відраховувати перед передаванням кадру, збільшується нелінійно зі збільшенням кількості активних станцій. Із застосуванням співвідношення (8) можна безпосередньо визначити кількість вільних часових слотів  $n_{idle}$ , що наявні в інтервалі часу реалізації віртуального конкурентного вікна, тобто:

$$n_{idle} = VCW \quad (9)$$

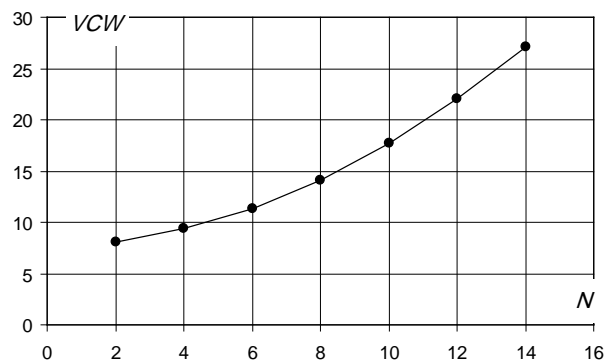


Рис. 6. Графік залежності віртуального конкурентного вікна  $VCW$  від кількості активних станцій  $N$  для випадку  $CW_{min} = 15$

Важливою характеристикою мережі, що впливає на всі якісні показники, є кількість колізій, що відбувається під час передавання кадру даних.

У межах віртуального конкурентного вікна кожна станція мережі передає  $N$  кадрів, тобто в середньому кожна із  $N$  станцій передає по одному кадру. На підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна можна визначити кількість колізій  $N_c$ , що відбувається в середньому під час передавання  $N$  кадрів даних.

Зробимо оцінювання кількості колізій із припущення, що в кожній колізії бере участь дві станції, оскільки така колізія є найбільш імовірною. Отримана оцінка буде верхньою межею кількості колізій, що може мати місце в насиченій мережі за час реалізації віртуального конкурентного вікна.

Кожна станція мережі може потрапити в колізію з імовірністю  $p_c$ . Але якщо одна станція потрапила в колізію, то це означає, що ще одна станція потрапила в колізію. Тобто в колізії бере участь колізійна пара. Оскільки в колізії бере участь  $N$  станцій, то на підставі припущення, що в колізії бере участь тільки дві станції, кількість колізійних пар буде дорівнювати  $N/2$ . Протягом

реалізації конкурентного вікна будуть мати місце колізії, що відбуваються на першій, другій і всіх інших можливих  $R$  стадіях доступу до каналу. Знайдемо число  $N_c$  як математичне сподівання числа колізій під час реалізації віртуального конкурентного вікна:

$$N_c = \frac{N}{2} p_c + \frac{N}{2} p_c^2 + \frac{N}{2} p_c^3 + \dots + \frac{N}{2} p_c^R = p_c \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{1 - p_c^{R+1}}{1 - p_c} \quad (10)$$

Графік залежності (10) наведено на рис. 7 для мережі, в якій за початковим налаштуванням застосовано  $CW_{\min} = 15$ , що має місце для більшості специфікацій IEEE 802.11.

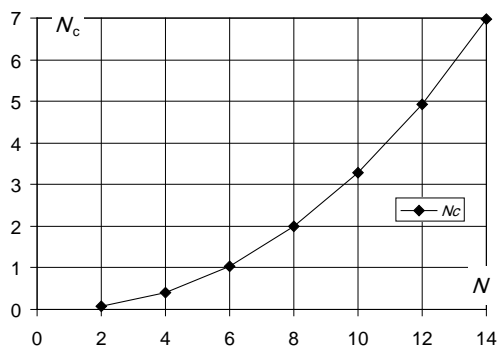


Рис. 7. Графік зміни кількості колізій  $N_c$  залежно від кількості активних станцій із насиченим навантаженням  $N$

Як і слід очікувати з фізичних міркувань, за наявності малої кількості станцій у мережі колізії будуть виникати рідко й їхня кількість значно менше кількості переданих кадрів. За наявності шести станцій у мережі буде мати місце одна колізія на шість переданих кадрів. Зі збільшенням кількості активних станцій кількість колізій нелінійно зростає, і за наявності чотирнадцяти активних станцій у мережі на чотирнадцять переданих кадрів буде відбуватися сім колізій. Тобто на кожен два передані кадри буде відбуватися в середньому одна колізія.

**Часові характеристики процесу передавання.** До часових характеристик процесу передавання кадрів віднесено середню затримку передавання та нерівномірність середньої затримки.

Середню затримку  $\bar{\tau}$  визначають як усереднене значення всіх затримок, що виникли під час передавання усіх блоків даних даного трафіка:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_i^{N^{(b)}} \tau_i, \quad (11)$$

де  $N^{(b)}$  – загальна кількість доставлених блоків даних;

$\tau_i$  – час затримки  $i$ -пакета.

Середня затримка передавання пакета даних через безпроводовий канал  $\tau$ , згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна, буде дорівнювати тривалості реалізації цього вікна. Такий взаємозв'язок впливає безпосередньо з визначення віртуального конкурентного вікна. Для середньої затримки можна записати:

$$\bar{\tau} = T_{VCW}. \quad (12)$$

Час реалізації віртуального конкурентного вікна можна визначити за співвідношенням:

$$T_{VCW} = N \cdot \bar{T}_{PL} + N_c \cdot \bar{T}_c + n_{id} \cdot \sigma, \quad (13)$$

де  $N$  – кількість активних станцій у мережі;

$\bar{T}_{PL}$  – тривалість усередненого часового інтервалу, протягом якого відбувається безпосереднє передавання кадру даних з урахуванням усіх допоміжних сигналів та інтервалів;

$\bar{T}_c$  – тривалість усередненого часового інтервалу колізії;

$\sigma$  – тривалість елементарного часового слота.

Перший доданок у правій частині (12) визначає час, витрачений усіма станціями на успішне передавання в середньому по одному кадру на кожен станцію. Другий доданок визначає час, витрачений на колізію всіма станціями. Третій доданок визначає час, протягом якого в межах віртуального конкурентного вікна всі станції знаходилися у стані декременту своїх лічильників і не передавали кадри даних (канал був вільним).

Значення нерівномірності затримки – джитера знайдемо за загальною формулою:

$$\sigma^{(\tau)} = \tau^{(max)} - \tau^{(min)} = 2\sqrt{D(\tau)}, \quad (14)$$

де  $\tau^{(max)} = \bar{\tau} + \sqrt{D(\tau)}$ ,  $\tau^{(min)} = \bar{\tau} - \sqrt{D(\tau)}$ .

Для визначення дисперсії скористаємося загальною формулою:

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_i^{N^{(b)}} (\tau_i - \bar{\tau})^2, \quad (15)$$

де  $N^{(b)}$  – загальна кількість переданих кадрів даних;

$\tau_i$  – затримка передавання окремого кадру даних.

На підґрунті концепції віртуального конкурентного вікна для визначення дисперсії скористаємося максимальними значеннями затримки передавання під час кожної із можливих спроб. У такому разі вираз (14) набуде іншого вигляду, а саме:

$$D(\tau) = \frac{1}{N^{(b)}} \sum_{j=1}^{m+1} N_j \cdot (\tau_j^* - \bar{\tau})^2, \quad (16)$$

де  $N_j$  та  $\tau_j$  – відповідно кількість кадрів даних та максимальна затримка передавання кадру даних через канал під час  $j$ -ої спроби,  $j \in \{1, 2, \dots, R\}$ .

Оскільки в квазістаціонарному режимі протягом часу реалізації віртуального конкурент-

ного вікна успішно буде передано певну частину кадрів із першої спроби, певну частину – з другої і певну частину – з кожної іншої можливої спроби, для розрахунку джитера можна обмежитися інтервалом реалізації віртуального конкурентного вікна.

Кількість кадрів, переданих під час  $j$ -ої спроби, можна визначити зі співвідношення:

$$N_j = N \cdot p_c^{j-1} \cdot (1 - p_c). \quad (17)$$

Максимальну затримку кадру даних у насиченій мережі у разі його успішного передавання під час  $j$ -ої спроби доступу до каналу можна визначити за співвідношенням:

$$\tau_j^* = (N \cdot P_s \cdot \bar{T}_{PL} + n_c \cdot \bar{T}_c) \cdot \frac{2^{j-1} \cdot (CW_{\min} + 1)}{VCW} + \sigma \cdot 2^{j-1} \cdot (CW_{\min} + 1). \quad (18)$$

Згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна, вважаємо, що процеси передавання кадрів, колізії та вільні часові слоти розподілені в часі рівномірно. Коефіцієнтом  $\frac{1}{VCW}$  враховуємо, скільки актів передавання кадрів і колізії припадає в середньому на один вільний часовий слот, що має місце під час реалізації віртуального конкурентного вікна з відомим значенням  $CW_{\min}$  та кількістю активних станцій у мережі  $N$ .

Таким чином, першим доданком у правій частині (18) враховано максимальний час очікування, поки в межах інтервалу реалізації віртуального вікна успішно передають усі станції мережі. Другим доданком враховано безпосередньо час очікування, зумовлений декрементом лічильника зворотного відліку за наявності вільних часових слотів.

#### Пропускна здатність безпроводового каналу.

Максимальну пропускну здатність каналу будемо розраховувати як деяке граничне значення без урахування шумів, електромагнітних завад і перешкод на фізичному рівні і без урахування колізій. Тобто це такі умови, коли кадри передає одна станція з насиченим навантаженням. За таких умов максимальну пропускну здатність можна визначити із застосуванням співвідношення [3]:

$$S_{\max} = \frac{E[PL_1]}{E[T_s] + \sigma \cdot CW_{\min} / 2}, \quad (19)$$

де  $E[PL_1]$  і  $E[T_s]$  – усереднені значення корисного навантаження і часу передавання одного кадру даних;

$\sigma$  – тривалість часового слота,  $\sigma \cdot CW_{\min} / 2$  – усереднене числове значення відстрочки між актами передавання двох послідовних кадрів даних, подане в одиницях часових слотів.

Пропускну здатність безпроводового каналу з  $N$  активними станціями з урахуванням колізій, але

без урахування завад та перешкод, згідно з концепцією віртуального конкурентного вікна, треба визначати як:

$$S = \frac{N \cdot E[PL_1] \cdot P_s}{T_{VCW}}. \quad (20)$$

За наявності завад у каналі будуть виникати спотворені кадри (erroneous frame). Кількість таких кадрів зручно характеризувати загальноприйнятим коефіцієнтом помилкових пакетів PER (Packet Error Ratio). У разі виникнення спотвореного кадру буде здійснене повторне передавання із застосуванням механізму подолання колізій. Тому для врахування впливу завад у всіх отриманих вище співвідношеннях замість ймовірності колізій треба використати ймовірність спотворення кадру:

$$p_{ef} = p_c + PER - p_c \cdot PER. \quad (21)$$

Значення коефіцієнта помилкових пакетів PER можна визначити або безпосереднім вимірюванням у зоні розгортання безпроводової мережі або на етапі проектування мережі шляхом моделювання процесів у безпроводовому каналі із застосуванням спеціалізованих програмних засобів. Наприклад, із застосуванням програмного комплексу ADS (Advanced Design System).

У разі визначення пропускну здатності безпроводової мережі з урахуванням впливу завад треба враховувати, що завади можуть призводити до спотворення як кадрів даних, так і кадрів керування.

Для каналу, в якому реалізовано безпосередній конкурентний доступ, час реалізації віртуального конкурентного вікна слід обчислювати за співвідношенням:

$$T_{VCW} = N \cdot T_{PL} + N \cdot PER \cdot T_{PL} + n_c T_c + \sigma \cdot VCW. \quad (22)$$

Для каналу, що функціонує в режимі RTS/CTS, час реалізації віртуального конкурентного вікна слід обчислювати за співвідношенням:

$$T_{VCW} = N \cdot T_{PL} + N \cdot PER \cdot (T_{PL} + T_{RTS}) + n_c T_c + \sigma \cdot VCW, \quad (23)$$

де  $T_{RTS}$  – витрати часу на передавання кадру RTS у мережі, що функціонує в режимі RTS/CTS.

**Висновки.** Концепція віртуального конкурентного вікна дає змогу отримати аналітичні співвідношення між системними параметрами безпроводової мережі (мінімальне значення конкурентного вікна, тривалість часового слота, часові інтервали передавання службових кадрів, кількість активних станцій у мережі) та її експлуатаційними характеристиками (пропускна здатність каналу, затримка передавання, нерівномірність затримки, ймовірність втрати кадру) в усьому можливому діапазоні зміни параметрів.

**Список літератури:**

1. Вишне夫斯基 В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. Москва : Техносфера, 2005. 592 с.
2. Performance analysis of IEEE 802.11ac wireless backhaul networks in saturated conditions / R. Liao et al. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2013. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/1687-1499-2013-226>.
3. Giuseppe B. Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. Vol. 18. № 3. P. 1055–1067.
4. Emerging Technologies in Wireless LANs. Theory, Design, and Deployment. Edited by BENNY BING. Georgia Institute of Technology, Cambridge University Press, 2008. 897 p.
5. Lazebnyi V.S., Yin C. Estimation of probabilistic processes in wireless networks of 802.11 standard. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2017. № 5. С. 47–53.
6. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification – 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA: IEEE Std 802.11, 2007. 1232 с. (2007 Edition).
7. Инь Ч., Лазебный В.С. Застосування концепції віртуального конкурентного вікна для прогнозування пропускної здатності сегмента безпроводової мережі Wi-Fi. *Проблеми інформатизації та управління*. 2017. Т. 4. № 60. С. 30–38.
8. Lazebnyy A.V., Lazebnyy V.S. The Details of Virtual Contention Window Concept for 802.11 IBSS Wireless Local Area Network Mathematic Modeling. *International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing*. 2013. Vol. 1. № 1. P. 7–13. URL: <http://doi.org/10.11648/j.wcmc.20130101.12>.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11 НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ВИРТУАЛЬНОГО КОНКУРЕНТНОГО ОКНА**

*В статье приведено обоснование расчетных соотношений для определения эксплуатационных характеристик беспроводной сети передачи данных стандарта IEEE 802.11, которая функционирует в режиме конкурентного доступа к среде передачи. Расчетные соотношения получены на основе концепции виртуального конкурентного окна, которая является альтернативой концепции временного слота. Применение концепции виртуального конкурентного окна позволило связать системные параметры, эксплуатационные характеристики и показатели качества беспроводной сети. Приведены соотношения для определения вероятности коллизий и успешной передачи кадров данных, для определения количества коллизий и количества свободных временных слотов в зависимости от количества активных станций, конкурирующих за доступ к каналу, а также соотношения для определения средней задержки передачи кадра и неравномерности задержки. Полученные соотношения позволяют более точно оценивать и прогнозировать эксплуатационные характеристики на этапе проектирования и эксплуатации беспроводных сетей стандарта 802.11.*

**Ключевые слова:** беспроводная сеть, задержка передачи, коллизия, конкурентный доступ, насыщенный режим, пропускная способность.

**DETERMINATION OF THE WIRELESS NETWORK CHARACTERISTICS OF IEEE 802.11 STANDARD ON THE BASICS OF THE VIRTUAL CONTENTION WINDOW CONCEPT**

*The article gives a justification of the calculation relations for determining the operational characteristics of the wireless data transmission network of the IEEE 802.11 standard, which operates in a mode of competitive access to the medium of transmission. The equations obtained on the basis of the concept of a virtual competitive window, which is an alternative to the concept of a time slot. The application of the concept of a virtual competing window has made it possible to link system parameters, performance and wireless network quality metrics. The article presents the equations to determine the likelihood of collisions and the successful transmission of data frames, to determine the number of collisions and the number of free time slots depending on the number of active stations competing for access to the channel, as well as the equations for determining the average frame delay and uneven delay. The obtained equations will allow to more accurately estimating and predicting the performance at the stage of design and operation of 802.11 wireless networks.*

**Key words:** competitive access, collision, saturated mode, throughput, transmission delay, wireless network.

УДК 621.396; 621.373

**Семенов А.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Політанський Р.Л.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**Гончарук А.В.**

Вінницький національний технічний університет

**Дурицький О.М.**

Вінницький національний технічний університет

**Чорний В.В.**

Вінницький національний технічний університет

## АНАЛІЗ АВТОКОЛИВНИХ СИСТЕМ ТРЕТЬОГО ПОРЯДКУ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР

У роботі наведено результати аналізу сучасних пристроїв генерування сигналів детермінованого хаосу на основі біполярних транзисторних структур із від'ємним диференційним опором. Наведено структури, функціональні схеми та математичні моделі трьох варіантів генераторів детермінованого хаосу на основі біполярних транзисторних структур із від'ємним диференційним опором, які придатні для реалізації в мікроелектронному виконанні. Отримано результати аналізу хаотичних режимів автоколивних систем третього порядку мікроелектронних генераторів детермінованого хаосу та розраховано їх параметри для забезпечення максимального значення старшого показника Ляпунова.

**Ключові слова:** детермінований хаос, генератор, транзисторна структура, від'ємний опір, математична модель, показник Ляпунова.

**Постановка проблеми.** Детермінований хаос – це складний, непорядкований рух нелінійних систем, що виникає в них за відсутності будь-яких випадкових збурень [1, с. 1]. Для реалізації технічного захисту інформації від несанкціонованого доступу, передавання та оброблення прихованих повідомлень актуальною науково-технічною задачею є розроблення та дослідження генераторів детермінованого хаосу. Такі генератори, хоча є детермінованими пристроями, здатні генерувати складні неперіодичні сигнали, які за своєю структурою є шумоподібними. Основними властивостями сигналів детермінованого хаосу є: 1) складна неперіодична траєкторія руху в часі; 2) широка смуга неперервного амплітудно-частотного спектра; 3) швидке затухання в часі їх автокореляційної функції; 4) висока інформаційна ємність. Тому для реалізації на практиці відомих методів хаотичного маскування та кодування інформації потрібно мати результати патентного огляду сучасних пристроїв генерування сигналів детермінованого хаосу на основі транзисторних

схем і структур, які сумісні з мікроелектронною технологією [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Хаотичні сигнали застосовують для маскування переданої інформації, а також створення прихованого (конфіденційного) зв'язку [4, с. 9]. Відомі технічні рішення побудови систем хаотичного радіозв'язку з відтворенням на приймальній стороні корисної інформації в умовах, коли хаотична носійна за енергетичним рівнем була нижчою за рівень шумів [4, с. 9]. Усе це зумовлює активні дослідження відомих і створення нових пристроїв генерування та формування сигналів детермінованого хаосу, що виконані на зосереджених елементах у мікроелектронному виконанні [5, с. 31].

Нині класифіковано десятки автоколивних систем простих мікроелектронних генераторів детермінованого хаосу [4], які реалізовано в різних схемотехнічних рішеннях [5; 6]. При цьому основну увагу приділено розробленню та дослідженню простих схемотехнічних рішень транзисторних генераторів детермінованого хаосу

[7, с. 38–41]. Мало уваги приділено розробленню та дослідженню генераторів детермінованого хаосу, що мають багатотранзисторні активні елементи зі складною геометричною формою вхідних та/або прохідних статичних вольт-амперних характеристик. Якщо окремі питання розроблення генераторів детермінованого хаосу на основі комплементарних МОН транзисторів були висвітлені в технічній літературі [5, п. 4.16, с. 235–238], водночас практично не приділено уваги питанням розроблення та дослідження генераторів детермінованого хаосу на базі складних активних елементів, що виконані на основі біполярних транзисторів з урахуванням особливостей інтегральної схемотехніки.

**Постановка завдання.** Метою роботи є патентний огляд та аналіз способів побудови, структур, функціональних схем і математичних моделей генераторів детермінованого хаосу з автоколивними системами третього порядку на основі біполярних транзисторних структур із від’ємним диференціальним опором. Для досягнення поставленої мети треба вирішити такі завдання: 1) здійснити огляд патентів на винахід із метою аналізу нових методів, способів і технічних рішень побудови транзисторних генераторів детермінованого хаосу з автоколивними системами третього порядку; 2) розглянути нові варіанти структур і функціональних схем транзисторних генераторів детермінованого хаосу з автоколивними системами третього порядку; 3) здійснити дослідження їх математичних моделей.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Відповідно до поставленої мети досліджень авторами було здійснено патентний пошук методів,

способів і технічних рішень побудови транзисторних генераторів детермінованого хаосу за останні 15 років. Автоколивні системи таких генераторів складаються з трьох реактивних елементів (як правило, двох ємностей та однієї індуктивності), лінійного опору та нелінійного опору, який є активним елементом генератора. На рис. 1 представлена еквівалентна схема транзисторного генератора детермінованого хаосу [8]. Спосіб побудови такого генератора хаотичних коливань становлять [8]: еквівалентна схема на рис. 1, схема електрична функціональна генератора на рис. 2 та математична модель у нормованих змінних (2) – (8).

Скорочена система диференціальних рівнянь у абсолютних і нормованих динамічних змінних має вигляд відповідно (1) і (2).

$$\begin{cases} \frac{du_{C1}}{dt} = \frac{i(u_{C2} - u_{C1})}{C_1}, \\ \frac{du_{C2}}{dt} = -\frac{i(u_{C2} - u_{C1}) + i_L}{C_2}, \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{u_{C2} + i_L}{L}. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = Af(y - x), \\ \frac{dy}{d\tau} = -f(y - x) - z, \\ \frac{dz}{d\tau} = B(y + z), \end{cases} \quad (2)$$

Вирази коефіцієнтів, безрозмірних змінних і нормованого часу [8]

$$\begin{aligned} A &= \frac{C_2}{C_1}, \quad B = \frac{C_2 R^2}{L}, \quad x = \frac{u_{C1}}{U_0}, \quad y = \frac{u_{C2}}{U_0}, \quad z = \frac{i_L R}{U_0}, \\ \tau &= \frac{t}{RC_2}, \quad U_0 = \sqrt{U_{01} U_{02}}, \end{aligned} \quad (3)$$

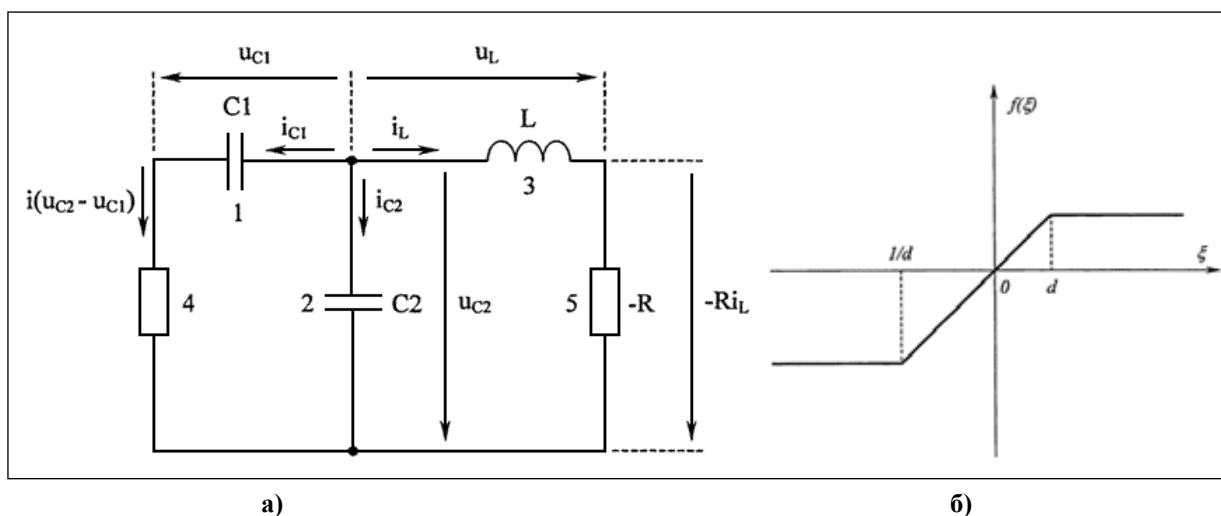


Рис. 1. Еквівалентна схема мікроелектронного генератора детермінованого хаосу (а) та графік нормованої ВАХ нелінійного елемента (б) [8]

де рівняння динамічної вольт-амперної характеристики нелінійного резистивного елемента

$$f(y-x) = \frac{i(u_{c2} - u_{c1})R}{U_0}, \quad (4)$$

Рівняння безрозмірної динамічної вольт-амперної характеристики активного елемента генератора щодо нормованих змінних [8]

$$f(y-x) = b(y-x) + \frac{a-b}{2}(d - |y-x-d|) + \frac{1-b}{2} \left( \left| y-x + \frac{1}{d} \right| - \frac{1}{d} \right), \quad (5)$$

де

$$a = g_0 R, \quad b = g_1 R, \quad d = \sqrt{\frac{U_{01}}{U_{02}}}, \quad (6)$$

Нелінійний резистивний елемент 4 у схемі на рис. 2 має наведену на рис. 1,б вольт-амперну характеристику, параметри якої рівні [8]

$$g_0 \approx \frac{1}{R3} - \frac{1}{R4} + \frac{1}{R5}, \quad g_1 \approx \frac{1}{R3} - \frac{1}{R4}, \quad (7)$$

$U_{01} \approx I_3 R5$ ,  $U_{02} \approx I_4 R5$ , звідки [8]

$$a \approx (R1 + R2) \left( \frac{1}{R3} - \frac{1}{R4} + \frac{1}{R5} \right), \quad (8)$$

$$b \approx (R1 + R2) \left( \frac{1}{R3} - \frac{1}{R4} \right), \quad d = \sqrt{\frac{I_3}{I_4}}$$

де R1, R2, R3, R4, R5 – опори, відповідно, першого 6, другого 7, третього 13, четвертого 14 і п'ятого 15 резисторів, I3 до I4 – значення вихідних струмів, відповідно, сьомого 20 і восьмого 21 генераторів струму.

В автоколивної системі (2)–(8) існують нерегулярні автоколивання, що характеризуються додатними значеннями старшого характеристичного показника Ляпунова [8]. Наприклад, при  $d = 1$ ,  $a = 1$ ,  $b = 0$ ,  $A = 0,08$ ,  $B = 0,1-0,3$  цей показник дорівнює 0,002–0,024, при  $d = 0,8$ ,  $a = 1$ ,  $b = 0$ ,  $A = 0,08$ ,  $B = 0,1-0,3$  він дорівнює 0,004–0,022, зокрема, при  $d = 1$ ,  $a = 1$ ,  $b = 0$ ,  $a = 0,08$ ,  $b = 0,2$  він

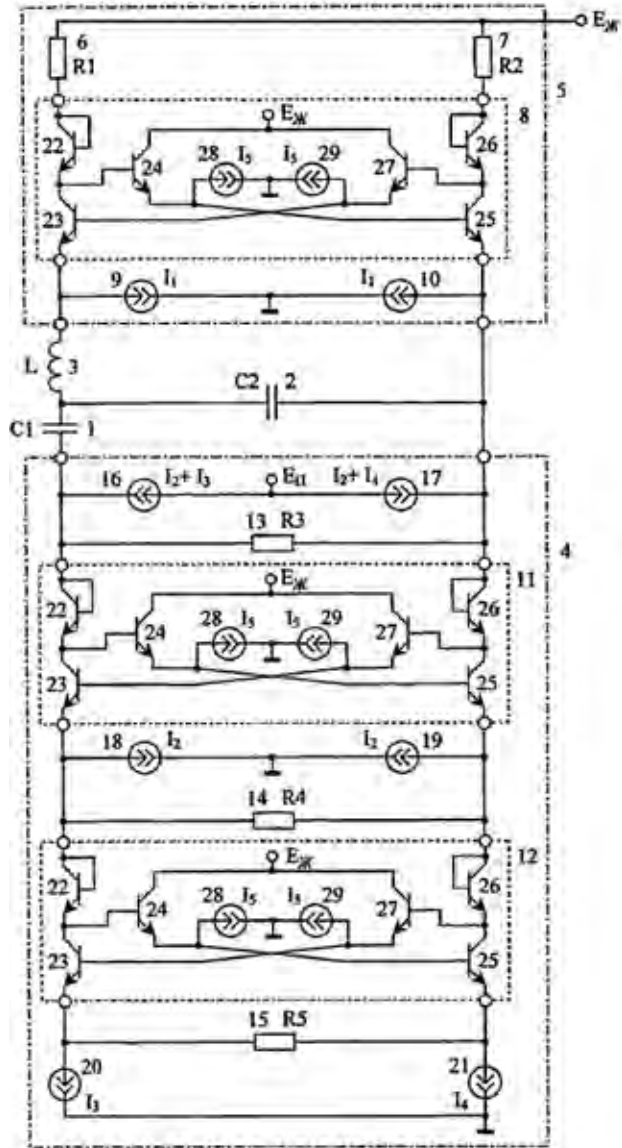


Рис. 2. Функціональна електрична схема варіанта 1 мікроелектронного генератора детермінованого хаосу [8]

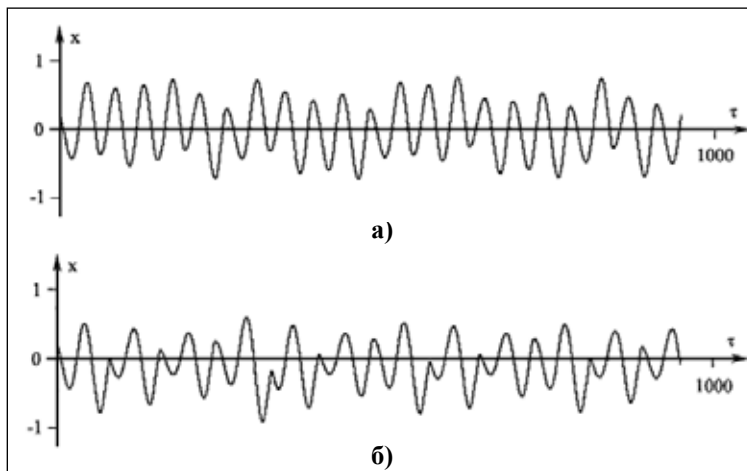


Рис. 3. Часові діаграми коливань динамічної змінної  $x$  у нормованому часі (3) при:  $a = 1$ ,  $b = 0$ ,  $d = 1$ ,  $A = 0,08$ ,  $B = 2$  (а) і  $a = 1$ ,  $b = 0$ ,  $d = 0,8$ ,  $A = 0,08$ ,  $B = 2$  (б)

близький до 0,02, при  $d = 0,8$ ,  $a = 1$ ,  $b = 0$ ,  $A = 0,08$ ,  $B = 0,2$  старший характеристичний показник Ляпунова приблизно дорівнює 0,012. Часові діаграми хаотичних коливань нормованої змінної  $x$  порівняно нормованого часу  $\tau$  та фазові портрети варіанта 1 генератора за різних значень параметрів автоколивної системи наведені на рис. 3 і рис. 4 відповідно.

Варіант 2 побудови генераторів сигналів детермінованого хаосу [9], який проаналізований у цій роботі, становлять: схема електрична структурна на рис. 5, схема електрична функціональна на рис. 6, математична модель у нормованих змінних (10)–(13).

Скорочена система диференціальних рівнянь в абсолютних і нормованих динамічних змінних має вигляд, відповідно, (9) і (10) [9]

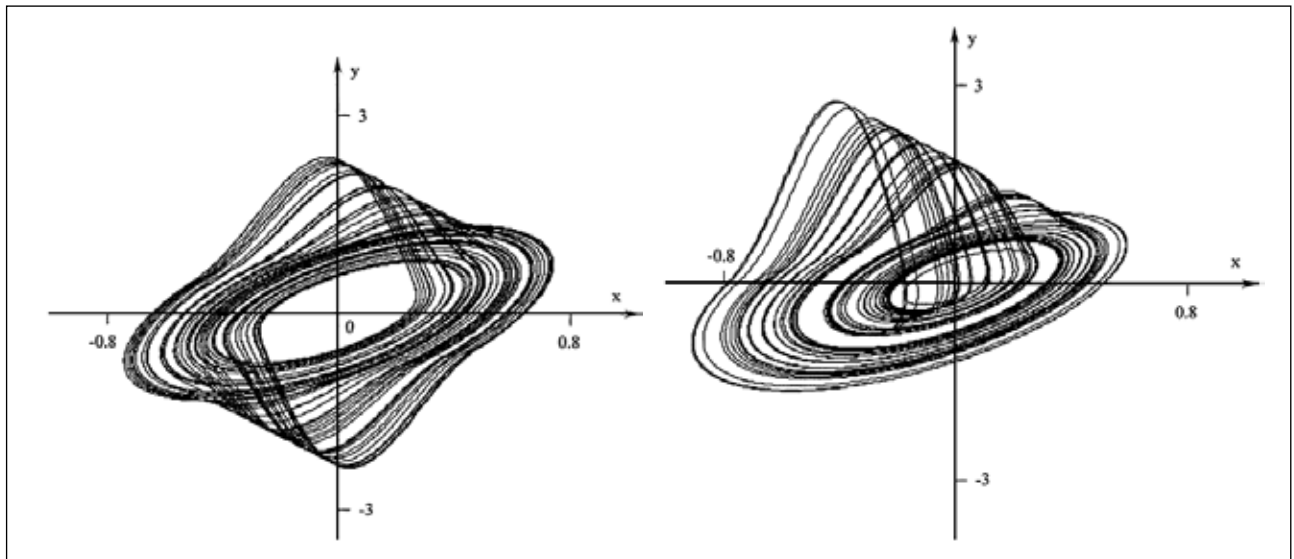


Рис. 4. Фазові портрети варіанта 1 мікроелектронного генератора детермінованого хаосу на рис. 2 у площині нормованих змінних  $x$ - $y$  при [8]:  $a = 1$ ,  $b = 0$ ,  $d = 1$ ,  $A = 0,08$ ,  $B = 2$  (а) і  $a = 1$ ,  $b = 0$ ,  $d = 0,8$ ,  $A = 0,08$ ,  $B = 2$  (б)

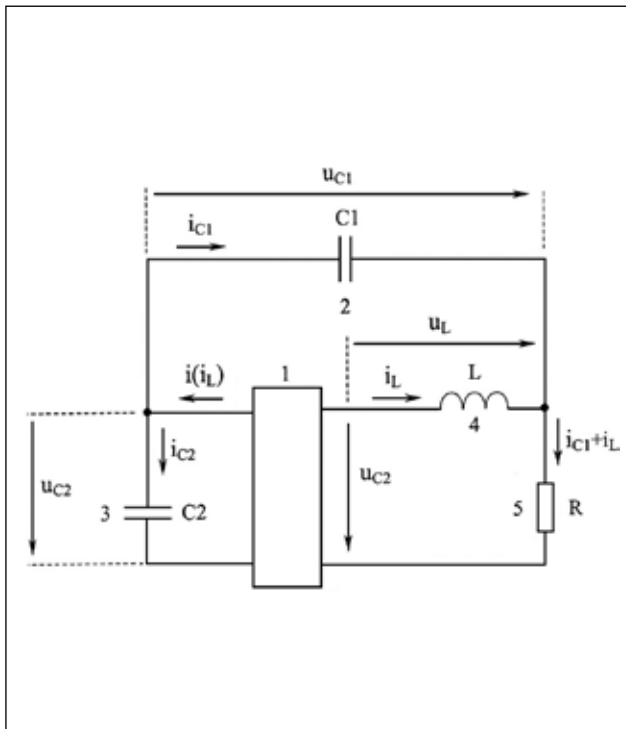


Рис. 5. Еквівалентна схема варіанта 2 генератора детермінованого хаосу [9]

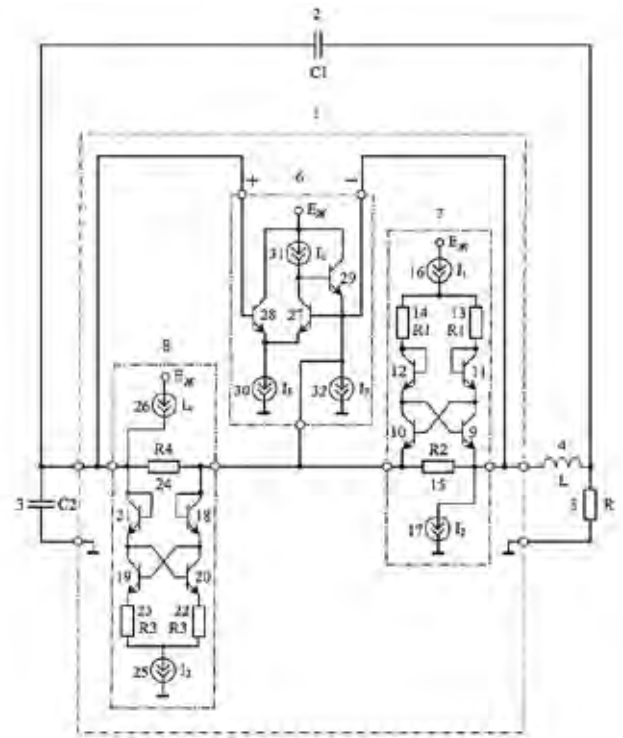


Рис. 6. Функціональна електрична схема варіанта 2 мікроелектронного генератора детермінованого хаосу [9]



$$\begin{cases} \frac{du_{C1}}{dt} = \frac{u_{C2} - u_{C1}}{R \cdot C1} - \frac{i_L}{C1}, \\ \frac{du_{C2}}{dt} = \frac{i(i_L) + i_L}{C2} + \frac{u_{C1} - u_{C2}}{R \cdot C2}, \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{u_{C1}}{L}. \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = A(y - x - z), \\ \frac{dy}{d\tau} = f(z) - y + x + z, \\ \frac{dz}{d\tau} = Bx, \end{cases} \quad (10)$$

Вирази коефіцієнтів системи, безрозмірних змінних і безрозмірного часу мають вигляд [9]

$$A = \frac{C2}{C1}, B = \frac{R^2 C2}{L}, x = \frac{u_{C1}}{R \cdot I_0}, y = \frac{u_{C2}}{R \cdot I_0}, z = \frac{i_L}{I_0}, \tau = \frac{t}{R \cdot C2}, \quad (11)$$

де безрозмірна передатна функція нелінійного елемента генератора (перетворювача імпедансу) [9]

$$f(z) = \frac{i(i_L)}{I_0} = bz + \frac{a-b}{2}(|z+1| - |z-1|), \quad (12)$$

Нелінійний перетворювач імпедансу в схемі на рис. 6 має передатну характеристику, що наведена в формулі винаходу патенту [9], параметри якої рівні [9]

$$a = \left(\frac{1}{R3} - \frac{2}{R4}\right) / \left(\frac{1}{R1} - \frac{2}{R2}\right), b = R2 \left(\frac{1}{R4} - \frac{2}{2R3}\right), I_0 = \frac{I_1}{2} \left(1 - \frac{2R1}{R2}\right), \quad (13)$$

де R1 – значення опору першого 13 і другого 14 резисторів, R2 – опір третього 15 резистора, R3 – значення опору четвертого 22 і п'ятого 23 резисторів, R4 – опір шостого 24 резистора, I<sub>1</sub> – значення вихідного струму першого 16 генератора струму. При цьому значення вихідних струмів I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub>, I<sub>5</sub>, I<sub>6</sub>, I<sub>7</sub>, відповідно, другого 17, третього 25, четвертого 26, п'ятого 30, шостого 31 і сьомого 32 генераторів струму мають задовольняти співвідношенням [9]

$$I_2 = \frac{I_1}{2}, I_3 > I_1, I_4 = \frac{I_3}{2}, I_5 \approx 2I_6, I_7 \approx I_6.$$

В автоколивній системі (10)–(13) існують нерегулярні автоколивання, які характеризуються додатними значеннями старшого характеристичного показника Ляпунова. Наприклад, при a = 4, b = -4, A = 0,5, B ≈ 7–12 цей показник дорівнює 0,2–0,5; зокрема, при a = 4, b = -4, A = 0,5, B = 10 він наближається до 0,45; при a = -2, b = 10, A = 0,5, B = 9–11 старший характеристичний показник Ляпунова лежить у межах від 0,25 до 0,4 [9]. Тому при таких значеннях коефіцієнтів a, b, A, B у схемі генератора на рис. 6 спостерігаються хаотичні коливання [9].

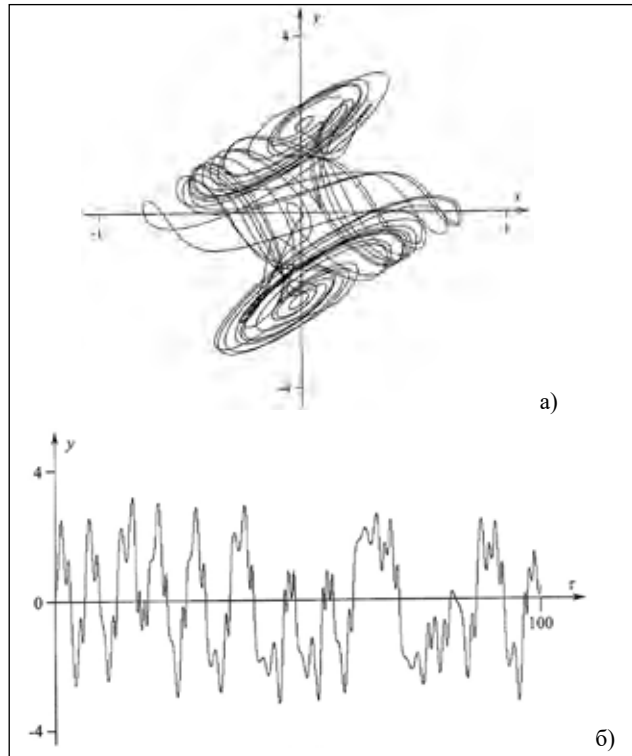


Рис. 7. Фазовий портрет (а) та хаотичні коливання (б) на виході варіанта 2 мікроелектронного генератора детермінованого хаосу, схема якого подана на рис. 6 [9]

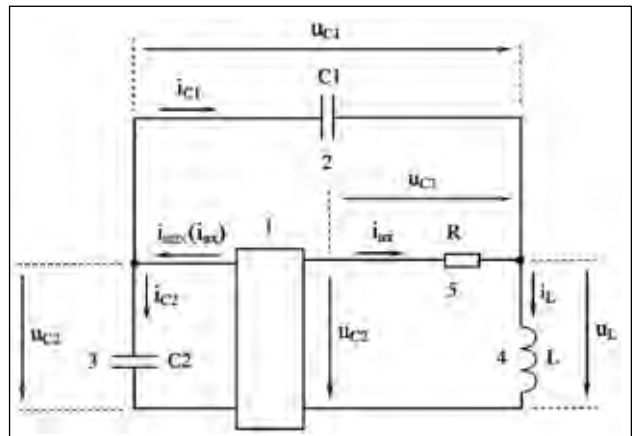


Рис. 8. Еквівалентна схема варіанта 3 генератора детермінованого хаосу [10]

Третій варіант побудови генераторів хаотичних коливань з автоколивною системою третього порядку становлять [10]: схема електрична структурна на рис. 8, схема електрична функціональна на рис. 9 та математична модель генератора у нормованих змінних(15)–(18).

Скорочена система диференціальних рівнянь має вигляд [10]

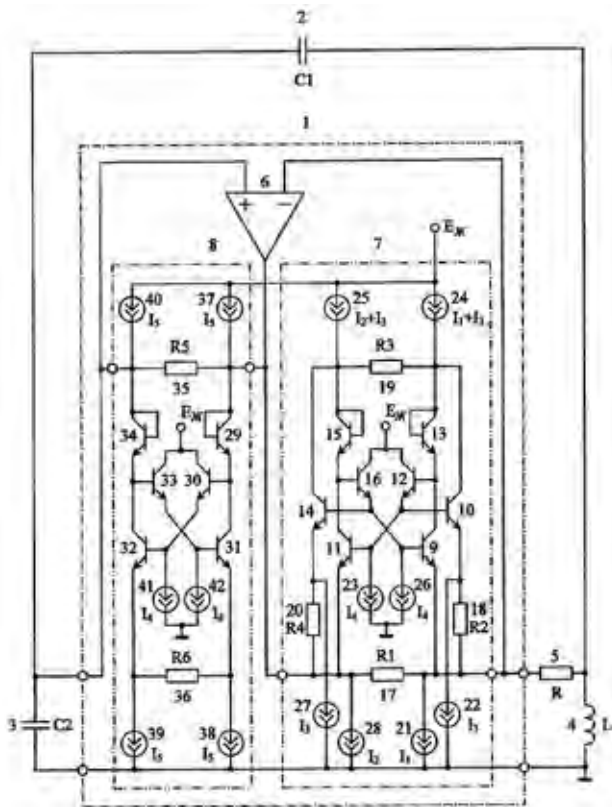


Рис. 9. Функціональна електрична схема варіанта 3 мікроелектронного генератора детермінованого хаосу [10]

$$\begin{cases} \frac{du_{C1}}{dt} = \frac{i_L}{C1} - \frac{u_{C1}}{R \cdot C1}, \\ \frac{du_{C2}}{dt} = \frac{i_{ВНХ} \left( \frac{u_{C1}}{R} \right) - i_L}{C2} + \frac{u_{C1}}{R \cdot C2}, \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{u_{C2} - u_{C1}}{L}. \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = A(z - x), \\ \frac{dy}{d\tau} = f(x) + x - z, \\ \frac{dz}{d\tau} = B(y - x), \end{cases} \quad (15)$$

Увівши безрозмірні змінні [10]

$$A = \frac{C2}{C1}, B = \frac{R^2 C2}{L}, x = \frac{u_{C1}}{R \cdot I_0}, y = \frac{u_{C2}}{R \cdot I_0}, z = \frac{i_L}{I_0}, \quad (16)$$

де рівняння безрозмірної передатної характеристики нелінійного перетворювача імпедансу

$$f(x) = \frac{i \left( \frac{u_{C1}}{R} \right)}{I_0} = \frac{b1 + b2}{2} x + \frac{a - b1}{2} (d - |x - d|) + \frac{a - b2}{2} \left( \left| x + \frac{1}{d} \right| - \frac{1}{d} \right), \quad (17)$$

Нелінійний перетворювач імпедансу в схемі на рис. 1.36 має наведену в формулі винаходу [10] передатну характеристику, параметри якої [10]

$$\begin{aligned} a &\approx \left( \frac{1}{R5} - \frac{1}{R6} \right) / \left( \frac{1}{R1} - \frac{1}{R3} \right), b1 \approx \left( \frac{1}{R5} - \frac{1}{R6} \right) / \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} \right), \\ b2 &\approx \left( \frac{1}{R5} - \frac{1}{R6} \right) / \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R4} \right), I_{01} \approx I_1 \left( \frac{1}{R3} - \frac{1}{R1} \right) / \left( \frac{1}{R3} + \frac{1}{R2} \right), \\ I_{02} &\approx I_2 \left( \frac{1}{R3} - \frac{1}{R1} \right) / \left( \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} \right), d = \sqrt{\frac{I_{01}}{I_{02}}}. \end{aligned} \quad (18)$$

Нехай як перший і другий ємнісні елементи використовуються перший і другий конденсатори, що мають ємності C1 і C2 відповідно, як індуктивний елемент використовується котушка індуктивності з індуктивністю L, R1 = 3 кОм, R5 = 600 Ом, C1 = 10 нФ, I0 = 400 мкА. Тоді хаотичні коливання, які відповідають випадку a = 4, b1 = b2 = -10, d = 1, A = 2, B = 5 спостерігаються в схемі на рис. 9 при R2 = R3 ≈ 3 кОм, R6 ≈ 120 Ом, C2 ≈ 20 нФ, L1 ≈ 4 мГн, I1 ≈ I2 ≈ 520 мкА, I3 = 5 мА, I4 = I6 = 1 мА, I5 = 10 мА. Для того, щоб коефіцієнти b1, b2, d прийняли значення b1 = -8, b2 = -12, d = 0,7, опори резисторів R2 і R3 необхідно змінити до R2 ≈ 2 кОм, R3 ≈ 4,5 кОм, а струми I1 й I2 до I1 ≈ 420 мкА, I2 ≈ 760 мкА [10].

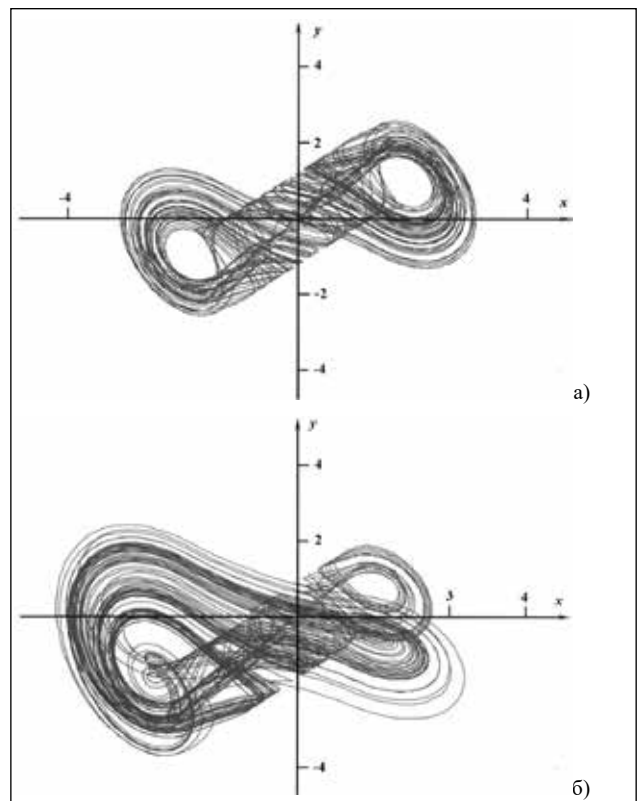
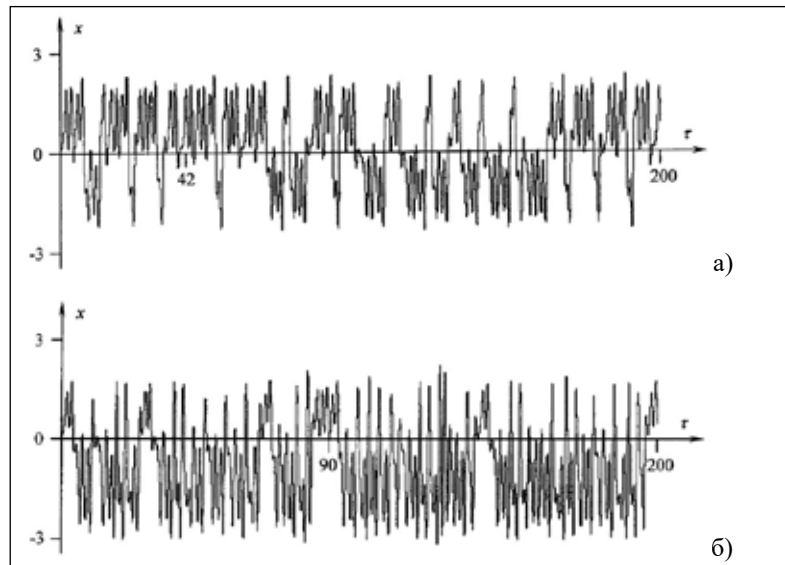


Рис. 10. Фазовий портрет генератора детермінованого хаосу на рис. 9 при [10]: a = 4, b1 = b2 = -10, d = 1, A = 2, B = 5 (а) і a = 4, b1 = -8, b2 = -12, d = 0,7, A = 2, B = 5 (б)

У системі (15) існують хаотичні автоколивання, що характеризуються позитивними значеннями старшого характеристичного показника Ляпунова. Напри-

клад, при  $a = 4$ ,  $b_1 = -8$ ,  $b_2 = -12$ ,  $d = 0,7$ ,  $A = 2$ ,  $B = 5-6,5$  цей показник дорівнює  $0,28-0,85$ , зокрема, при  $B = 5$  він близький до  $0,46$ ; при  $a = 4$ ,  $b_1 = b_2 = -10$ ,  $d = 1$ ,  $A = 2$ ,  $B = 5-6,5$  цей показник дорівнює  $0,28-0,45$ , зокрема, при  $B = 5$  він близький до  $0,41$ ; при  $a = -12$ ,  $b_1 = 7$ ,  $b_2 = 8$ ,  $d = 1$ ,  $A = 2$ ,  $B = 7-12$  старший характеристичний показник Ляпунова лежить в межах від  $0,4$  до  $0,7$  [10].

**Висновки.** У роботі наведено результати патентного огляду сучасних способів побудови та схематичних рішень мікроелектронних генераторів детермінованого хаосу. Наведено структури, функціональні схеми та математичні моделі трьох варіантів мікроелектронних генераторів детермінованого хаосу на основі біполярних транзисторних структур. Проаналізовано хаотичні режими роботи їх автоколивних систем. За результатами здійсненого аналізу виявлено, що максимальні інформаційні властивості мають ха-



**Рис. 11.** Хаотичні коливання варіанта 3 мікроелектронного генератора детермінованого хаосу на рис. 9 при [10]: а)  $a = 4$ ,  $b_1 = b_2 = -10$ ,  $d = 1$ ,  $A = 2$ ,  $B = 5$ ; б)  $a = 4$ ,  $b_1 = -8$ ,  $b_2 = -12$ ,  $d = 0,7$ ,  $A = 2$ ,  $B = 5$

тичні сигнали варіанта 3 мікроелектронного генератора, для якого максимальне значення старшого показника Ляпунова  $0,7-0,85$ .

#### Список літератури:

1. Губанов Д., Дмитриев А., Панас А., Старков С., Стешенко В. Генераторы хаоса в интегральном исполнении. *Chipnews*. 1999. № 8. Paper 9. [http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99\\_08/stat\\_9.htm](http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/99_08/stat_9.htm) (дата звернення: 25.03.2019).
2. Иманбаева А.К., Темирбаев А.А., Сыздыкова Р.Н., Каирмагамбетова А.К. Компьютерное моделирование автогенераторов в пакете ADVANCED DESIGN SYSTEM. *Вестник Алматинского университета энергетики и связи*. 2015. <https://articlekz.com/article/13664> (дата звернення: 25.03.2019).
3. Булюк І., Матвійчук Я. Криптосистема зв'язку на схемі Чуа. *Теоретична електротехніка*. 2007. Вип. 59. С. 48–51.
4. Darstellung von Attraktoren und Fraktalen mit Cinema Teil 3. URL: <http://www.3d-meier.de/tut19/Seite0.html> (дата звернення: 27.03.2019).
5. Шахтарин Б.И., Кобылкина П.И., Сидоркина Ю.А. и др. Генераторы хаотических колебаний : учебн. пособие. Москва : Гелиос АРВ, 2014. 248 с.
6. Генерация хаоса / Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И.; под общ. ред. Дмитриева А.С. Москва : Техносфера, 2012. 424 с.
7. Кузнецов С.П. Простые электронные генераторы хаоса и их схемотехническое моделирование. *Известия вузов «Прикладная нелинейная динамика»*. 2018. Т. 26, № 3. С. 35–61.
8. Прокопенко В.Г. Генератор хаотических колебаний : патент 2479105 РФ. № 2012108016/08 ; заявл. 01.03.2012 ; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10. 13 с.
9. Прокопенко В.Г. Генератор хаотических колебаний : патент 2273088 РФ. № 2004130933/09 ; заявл. 22.10.2004 ; опубл. 27.03.2006, Бюл. № 9. 10 с.
10. Прокопенко В.Г. Генератор хаотических колебаний : патент № 2416144 РФ. № 2009142658/09 ; заявл. 18.11.2009 ; опубл. 10.04.2011, Бюл. № 10. 14 с.

#### АНАЛИЗ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ХАОСА НА ОСНОВЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР

В работе приведены результаты анализа современных устройств генерирования сигналов детерминированного хаоса на основе биполярных транзисторных структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Приведены структуры, функциональные схемы и математические модели трех

*вариантов генераторов детерминированного хаоса на основе биполярных транзисторных структур с отрицательным дифференциальным сопротивлением, пригодные для реализации в микроэлектронном выполнении. Получены результаты анализа хаотических режимов автоколебательных систем третьего порядка микроэлектронных генераторов детерминированного хаоса и рассчитаны их параметры для обеспечения максимального значения старшего показателя Ляпунова.*

**Ключевые слова:** *детерминированный хаос, генератор, транзисторная структура, отрицательное сопротивление, математическая модель, показатель Ляпунова.*

#### **ANALYSIS OF THIRD-ORDER SELF-OSCILLATORY SYSTEMS OF MICROELECTRONIC DETERMINISTIC CHAOS OSCILLATORS BASED ON BIPOLAR TRANSISTOR STRUCTURES**

*The paper presents results of analyzing modern devices for generating deterministic chaos signals based on bipolar transistor structures with negative differential resistance. Structures, functional diagrams and mathematical models for three variants of the deterministic chaos oscillators based on bipolar transistor structures with negative differential resistance for microelectronic implementation have been presented. Results of analyzing chaotic modes of the third-order self-oscillatory systems of microelectronic deterministic chaos oscillators have been obtained. Their parameters have been calculated to provide maximal value of the senior Lyapunov exponent.*

**Key words:** *deterministic chaos, oscillator, transistor structure, negative resistance, mathematical model, Lyapunov exponent.*

УДК 621.38

**Тищенко О.С.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Гумен Т.Ф.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Трапезон К.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕХНОЛОГІЇ BLOCKCHAIN В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

*Визначено особливості технології блокчейн, де на основі введеного поняття блоку даних розглянуто принципи створення алгоритму передавання даних між різними вузлами інформаційної системи. Проаналізовано принципи захисту даних у технології, де зазначено, що на основі криптографічного алгоритму SHA-256 рекомендується задля підвищення захисту інформації використовувати додатково схему цифрового підпису еліптичної кривої. Досліджено алгоритм, за яким формується унікальна адреса біткойну і проаналізовано алгоритм захисту створеної адреси. За результатами проведеного дослідження можна зробити висновок, що ключові положення реалізації технології блокчейн через впроваджену процедуру передавання транзакцій можуть бути адаптовані і на етапі створення архітектури однорангової телекомунікаційної мережі.*

**Ключові слова:** протокол, система, інформація, телекомунікаційна мережа, захист.

**Постановка проблеми.** Конфіденційність, безпека, надійність, цілісність інформації, яка передається між різними користувачами системи, останнім часом потребує від боку фахівців із розробки телекомунікаційних мереж найширшої уваги. Особливо актуальним є момент, коли передаються конфіденційні дані, які стосуються відкриття доступу до захищених банківських профілів клієнтів. Разом із тим наявні алгоритми захисту, політика їх використання не завжди можуть бути гарантом від сторонніх мережевих атак, тоді як реалізація виділеного з'єднання може бути недоцільною і фізично не реалізованою, з огляду на особливості функціонування телекомунікаційної мережі. Технології блокчейн, протоколи та архітектура як окрема реалізація новітньої інформаційної системи можуть бути взяті за основу у процесі створення нової захищеної системи передавання та обміну даними.

**Постановка завдання.** Розгляд технології блокчейн, її структури, визначення особливостей захисту даних, особливо під час реалізації відомого нині алгоритму майнінгу можуть бути використані у процесі створення удосконаленого прототипу банківської розрахункової системи, де основною складовою частиною передавання даних є транзак-

ція. Натомість ресурси платіжної системи біткойн можуть бути поштовхом до переобладнання наявних телекомунікаційних мереж із позицій забезпечення в останніх ширшої розгалуженості, підвищеної захищеності даних у відповідальних вузлах, чіткої прозорості під час отримання доступу до інформаційних ресурсів цієї мережі. Таке рішення в рамках дослідження обране з того принципу, що саме в технології блокчейн можна прослідкувати та спрогнозувати усі дії з передавання даних завдяки логічно побудованій та чітко організованій архітектурі зв'язку кінцевих вузлів.

**Метою статті** є дослідження технології блокчейн, визначення її особливостей до технічного спрямування у процесі конструювання удосконаленої телекомунікаційної мережі обміну даних на основі чинних алгоритмів та підходів, зокрема алгоритму біткойн та протоколу ethereum. Так, передбачається, що розглянуті положення структури системи, захисту даних, аналізу зв'язків між вузлами можуть бути підґрунтям подальшого розгортання інформаційної мережі, яка підтримує, наприклад, платіжні банківські послуги по усьому світі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Нині інформаційні технології розвиваються дуже

стрімко, й однією з порівняно нових технологій є Blockchain, яка вперше стала відомою завдяки терміну Bitcoin (криптографічна валюта). Основи та принципи роботи нової технології швидко поширились на широкий спектр нових проектів через певні властивості, які пропонує технологія blockchain. Незважаючи на те, що спочатку вона використовувалася для підтримки цифрової валюти, ця технологія може бути реалізована в різних галузях, які зазвичай вимагають двох або більше сторін чи вузлів, які співпрацюють між собою у формі валюти, послуги, товарів або цифрових даних. Одним із ключових понять є транзакція. Блокчейн – це фактично книга, що містить цифрову інформацію, пов’язану з транзакціями та подіями. Головну книгу зберігають на кількох комп’ютерах, які здатні порівнювати, надаючи головній книзі характеристику розподілу в кількох місцях одночасно. Єдиний спосіб змінити або додати інформацію до розподіленої книги полягає в тому, щоб більше 51% комп’ютерів погодилися на нову інформацію. Хеш транзакцій і подій об’єднуються в одну групу, відому як блок. Блоки разом із тим секвенуються за часом і використовують інформацію з попереднього блоку, значення транзакцій і третю змінну для створення наступного заголовка блоку, для позначення позиції блоку, як правило, у вигляді хеш-виходу. Вихід заголовка блоку буде включений в основу наступного блоку для збереження як блоків, ланцюгових послідовно, своєю чергою, утворюючи блокчейн.

**Структура системи**

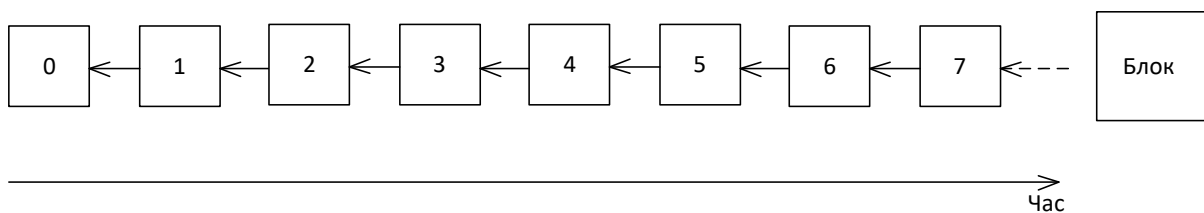
Що стосується кожної частини системи blockchain, то правила, які написані у вихідному коді Bitcoin, визначають структуру блоку Bitcoin. Блок складається з п’яти полів, як показано в байті нижче на рисунку 1. Підпис файлу, який також називається «магічним» числом, є постійним шістнадцятковим значенням D9 B4 BE F9 (рис. 1) і використовується як ідентифікатор блоку Bitcoin у мережі. Друге поле вказує розмір наступного блоку в байтах, а четверте – кількість включених транзакцій. Ці три поля складають

метадані з метою організації мережевого зв’язку. Однак дві основні частини – це 80-байтовий заголовок блоку і дані про транзакції, що використовують решту блоків, які є штучно встановленою верхньою межею для одного блоку: один мегабайт.



**Рис. 1. Блок Bitcoin спрощений за допомогою байт-карти [1]**

Блоки в блокчейні з’єднані між собою. Перший блок – блок генезису, закодований у вихідний код. Він має хеш-показник тільки з нулями і тому вважається, що він не має попереднього блоку. Крім того, він містить деякі довільні дані в межах своєї транзакції, що можна ідентифікувати. Використання іншого блоку генезису означає виключення, і це призводить до наявності іншого ланцюга. Кінець ланцюжка є останнім блоком, хеш якого ще не використовується як вхід для іншого блоку. Ми можемо легко уявити сценарій, в якому один і той самий блок використовується як вхід для двох різних блоків, таким чином, з’єднаний із більш ніж одним наступним блоком. Це цілком можливо. Тим не менш вихідний код визначає правило – є тільки один дійсний ланцюжок, який є найдовшим шляхом від блоку генезису до кінцевого блоку. Вона містить найбільшу кількість блоків або, більш точно, найбільшу хешівську потужність. Запуск клієнта BitcoinCore показує, що основний ланцюжок (рис. 2) має висоту близько 487 000 блоків. Всі інші блоки, що не входять до



**Рис. 2. Блоки в прямій ланцюга [2]**

основного ланцюга, входять до складу видобувних вилок і маркуються застарілими чи сиротами. Описану архітектуру можна спроектувати під час створення зв'язків між вузлами аналогічної телекомунікаційної системи, яка спрямована на передавання інформації.

**Захист даних у технології Blockchain**

Шифрування, що використовується в технології, являє собою тип криптографічного хеш-алгоритму, відомого як Secure Hash Algorithm–256, де хеш – це вихід алфавітно-цифрових символів, які обчислюються з вихідного звичайного тексту, який використовується як вхідний. Bitcoin не встановлює жодної форми системи балансу рахунку. Скоріше, правила вихідного коду говорять: «Кожен, хто отримує справжній логічний запуск сценарію виводу транзакції, має право використовувати суму значення параметра як вхідні дані для іншої транзакції». Доцільною аналогією для цієї концепції є публічне сховище для одноразового використання, де кожен може кинути один елемент (вхід транзакції), але тільки особа, яка знає код ключа в сховищі, може отримати цей конкретний елемент (кінець транзакції). Для реалізації цієї концепції цифровим способом Bitcoin використовує схему цифрового підпису. Схема є алгоритмом цифрового підпису еліптичної кривої (ECDSA), перевіреним і широко використовуваним у світі стандартом. Зазначимо, що Bitcoin не використовує RSA-стандарт головним чином тому, що ECDSA забезпечує ту саму безпеку з більш короткими значеннями ключів, що є необхідною властивістю для забезпечення пропускну здатності в одноранговій телекомунікаційній мережі.

Сценарій виведення транзакції містить хеш відкритого ключа. Щоб виконати скрипт з істинними даними, відправник має надати *відкритий ключ*, який при хешуванні дає адресу призначення, і *підпис*, щоб показати доказ відповідного

закритого ключа. Як алгоритм хеш-перетворення Bitcoin послідовно поєднує хеш-функції SHA-256 і RIPEMD-160, а також додає байт версії і кодування двійкового тексту в Base58Check. Ця процедура робиться з метою отримання дуже високого рівня випадковості в хеш-виході і захисту від випадкових зіткнень. Це робить хеш-вивід зручним способом вираження ідентичності. Вихідний сценарій використовує цю ідентифікацію як адресу призначення. Зразковий адрес Bitcoin може виглядати так:

31qXHBL8nJc6kpVRrWNQ4XccgEsgTf9nNQ

Адреса надає людям псевдоанонімність, оскільки адреси можна простежити і пов'язати назад до транзакцій раніше, але учасник може створювати нові ідентичності дуже легко і в автономному режимі. Використання адреси лише один раз і здійснення транзакцій з якомога меншою кількістю входів і виходів приносить вищу анонімність з'єднань.

**Ethereum протокол**

Ethereum є альтернативним протоколом блокчейн із підходом загального призначення задля полегшення побудови всіх концепцій кінцевих машин на основі транзакцій. Будучи абстрактним фундаментним шаром, блокчейн із вбудованою мовою програмування Тьюринга дає змогу будь-кому писати смарт-контракти і децентралізовані програми, де вони можуть створювати свої власні довільні правила для володіння, форматів транзакцій і функцій переходу. Крім моделі валюти, машини можуть обробляти інші активи, такі як запаси та нерухомість, або відстежувати предмети в їх ланцюзі.

Отримання унікально ідентифікованих адрес в Ethereum нагадує процес у Bitcoin (рис. 4). Відкриті ключі побудовані з приватних ключів через ECDSA і використовуються як вхідні дані для алгоритму хешування. Останні 20 байтів виводу є асоційованою адресою до закритого ключа.

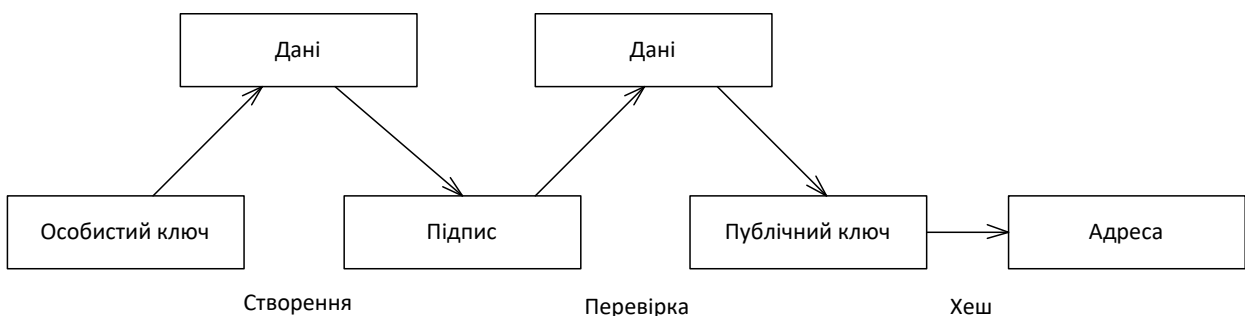


Рис. 3. Утворення адреси Bitcoin

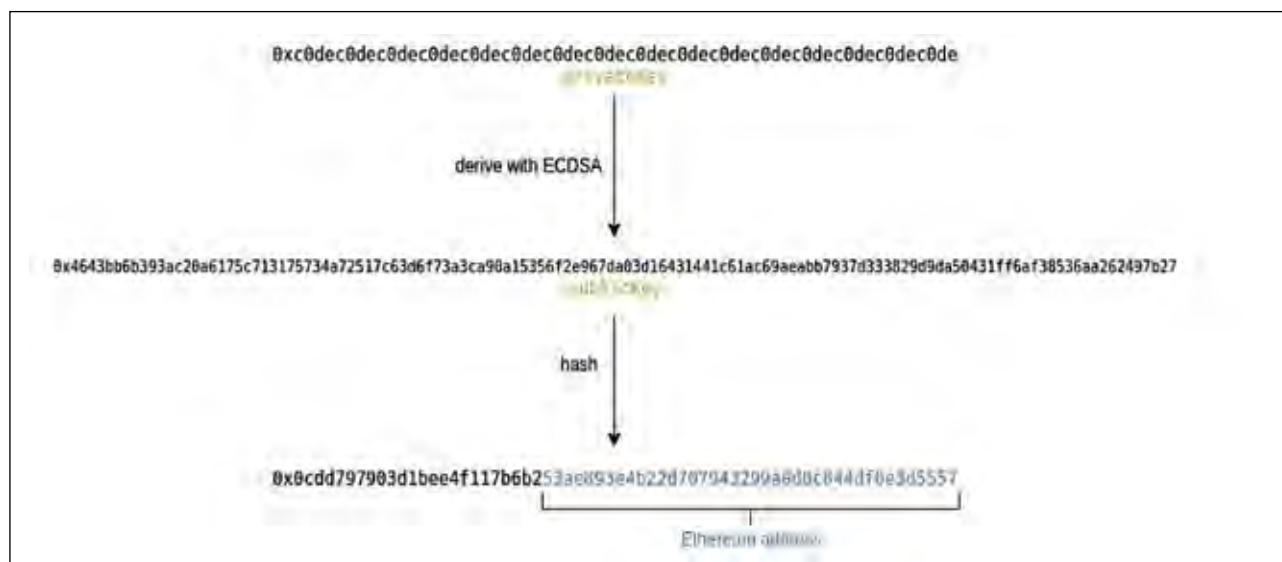


Рис. 4. Утворення адреси Ethereum

Зазначимо, що алгоритм хешування у Ethereum не SHA-256, застосований у Bitcoin, а Кескак-256 (SHA-3). Цей алгоритм є ще одним стандартом, встановленим Національним інститутом стандартів і технологій (NIST) після того, як були виявлені деякі атаки на SHA-2, які з часом виявилися невирішеними. Фонд Ethereum, однак, планує оновити можливість для рахунків індивідуально реалізувати власну схему цифрового підпису з будь-яким алгоритмом хешування. Це дозволить, наприклад, поєднання обох SHA-2 і SHA-3 послідовно, щоб зробити ідентичність більш безпечною, аби можна було б використовувати одноразову схему сигналізації Lamport для квантового опору. Це відхилення від версії, жорстко закодованої в обробку транзакцій, до версії, що реалізується обліковим записом, надає велику перевагу гнучкості для Ethereum, щоб відповідати різноманітним потребам додатків. Це особливо справляється з розвитком криптографічної безпеки в довгостроковій перспективі.

Транзакція Ethereum складається з семи полів, як показано на рисунку 5. У “nonce” зберігається кількість транзакцій, надісланих відправником. Поле “to” вказує адресу одержувача, яка завжди точно одна, оскільки моделі облікового запису не потребують кількох виходів. Скалярне значення являє собою кількість ефіру в “Wei” для передачі. І останнє поле містить відповідний висновок з алгоритму підпису, щоб показати докази знання приватного ключа. Як пояснюється в моделі обліку, UTXO-модель Bitcoin також може розкрити всю інформацію з цих полів.

### Smartcontracts

Ця програма вважається найбільш амбітною. Ключова ідея інтелектуальних контрактів полягає в тому, що умови та інформація можуть бути укладені в контракт, і якщо терміни реалізуються, контракт виконується автоматично. Однак, якщо умови не виконуються, контракт не набуває чинності. Можливість вбудовування інформації в блокчейн дає змогу здійснювати захищені контракти між особами, які не потребують підтвердження третьою стороною. Крім того, жодна зі сторін не може порушити умови угоди в інтелектуальному контракті. Інтелектуальні контракти можуть бути адаптовані до всіх видів контрактів; біткоіни можуть бути відправлені в правильних обставинах, і організації можуть запрограмувати у свої контракти, щоб вони автоматично виплачували дивіденди своїм зацікавленим особам, якщо і коли досягнуто певного рівня прибутку. Ці інтелектуальні контракти революціонізують те, як нині укладаються контракти, роблячи їх дешевшими, коли необхідність посередника перевіряти контракти усувається. Надійність посилюється однією з ключових функцій блокчейну, а саме тим, що вона захищена від несанкціонованого доступу.

**Висновки.** Визначено особливості технології блокчейн, де на основі введеного поняття блоку даних розглянуто принципи створення алгоритму передавання даних між різними вузлами інформаційної системи. Проаналізовано принципи захисту даних у технології, де зазначено, що на основі криптографічного алгоритму SHA-256 рекомендується задля підвищення



захисту інформації використовувати ще схему цифрового підпису еліптичної кривої. Досліджено алгоритм, за яким формується унікальна адреса біткоїну і проаналізовано алгоритм захисту створеної адреси. За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що ключові положення реалізації технології блокчейн через процедуру передавання транзакцій можуть бути адаптовані на етапі створення архітектури однорангової телекомунікаційної мережі.

Transaction	Transaction
-nonce	-nonce
-gasPrice	-gasPrice
-gasLimit	-gasLimit
-to	-to
-value	-value
-init	-data
-sig tuple	-sig tuple
{...}	{...}

Рис. 5. Операції Ethereum для створення контракту (ліворуч) і виклику повідомлення (праворуч)

#### Список літератури:

1. Лелу Л. Блокчейн от А до Я. Все о технологии десятилетия. Європа : Ексмо, 2018. 256 с.
2. Тапскотт А., Тапскотт Д. Технология блокчейн. То, что движет финансовой революцией сегодня. Європа : Ексмо, 2016. 448 с.
3. Могайар В. Блокчейн для бізнеса. Європа : Ексмо, 2017. 224 с.
4. Що таке блокчейн простими словами. Prostocoin – провідник у світі криптовалют. URL: <https://prostocoin.com/blog/blockchain-guide> (дата звернення: 23.01.2019).
5. Блокчейн (цепочка блоків). Альфари вільне джерело. URL: <https://alpari.com/ru/beginner/glossary/blockchain/> (дата звернення: 30.01.2019).
6. Райт А., Де Фліппі П. Децентралізована технологія блокчейн і підйом Lex Cryptographia. 2015. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2580664](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2580664) (дата звернення: 30.01.2019).

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ BLOCKCHAIN В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

*Определены особенности технологии блокчейн, где на основе введенного понятия, блока данных рассмотрены принципы создания алгоритма передачи данных между различными узлами информационной системы. Проанализированы принципы защиты данных в технологии, где отмечено, что на основе криптографического алгоритма SHA-256 рекомендуется для повышения защиты информации использовать еще схему цифровой подписи эллиптической кривой. Исследован алгоритм, по которому формируется уникальный адрес биткоина и проанализированы алгоритм защиты созданного адреса. По результатам проведенного анализа можно сделать вывод, что ключевые положения реализации технологии блокчейна через процедуру передачи транзакций могут быть адаптированы на этапе создания архитектуры одноранговой телекоммуникационной сети.*

**Ключевые слова:** протокол, система, информация, телекоммуникационная сеть, защита.

### INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN DATA TRANSMISSION INFORMATION SYSTEMS

*The peculiarities of Blockchain technology are determined, where on the basis of the introduced concept of the data block the principles of creation of the algorithm of data transmission between different nodes of the information system are considered. The principles of data protection in technology have been analyzed, where it is noted that on the basis of the cryptographic algorithm SHA-256, it is recommended to use the scheme of the digital signature of the elliptic curve to improve the information security. The algorithm, which forms the unique bitcoin address and analyzes the algorithm for the protection of the created address, is investigated. According to the results of the analysis, it can be concluded that the key provisions of the implementation of the blockchain technology through the transaction transfer procedure can be adapted at the stage of creating the architecture of a peer-to-peer telecommunication network.*

**Key words:** protocol, system, information, telecommunication network, protection.

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.2

*Бабаков Р.М.*

Донецький національний університет імені Василя Стуса (г. Вінниця)

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИНТЕЗА МИКРОПРОГРАММНЫХ АВТОМАТОВ С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

*В статье рассматриваются известные подходы и методы построения микропрограммных автоматов с операционным автоматом переходов. Проводится обзор публикаций по вопросам структурной организации, математической модели, алгебраического синтеза, подходов к оптимизации и оценке эффективности данного класса автоматов. Очерчиваются направления и перспективы дальнейших исследований.*

*Ключевые слова:* микропрограммный автомат, операционный автомат переходов, методология синтеза, структура, оптимизация аппаратных затрат.

**Постановка проблемы.** Микропрограммный автомат (МПА) как разновидность устройств управления предназначен для координации работы блоков цифровой системы [1, с. 426; 2, с. 114]. Одной из разновидностей МПА является микропрограммный автомат с операционным автоматом переходов (МПА с ОАП), в котором преобразование кодов состояний выполняется не в соответствии с системой канонических уравнений, а с помощью множества арифметико-логических операций. При этом актуальной научной проблемой является минимизация аппаратных затрат в МПА с ОАП, что позволяет снизить стоимость схемы МПА и цифровой системы в целом [3, с. 22].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Микропрограммному автомату с операционным автоматом переходов посвящен ряд публикаций, которые тематически можно разделить на следующие группы:

- принцип операционного преобразования кодов состояний;
- структурная и функциональная организация;
- математическая модель;
- алгебраический синтез;
- методы оптимизации;
- оценка эффективности по критерию аппаратных затрат.

Детальный анализ публикаций выполнен ниже в основной части работы.

**Постановка задачи.** К настоящему времени множество научных работ, посвященных данному классу МПА, является несистематизированным, что затрудняет понимание концепции операционного преобразования кодов состояний и выбор дальнейших направлений исследований. С этой точки зрения актуальным является выполняемый в данной работе обзор методологических аспектов синтеза МПА с ОАП на основе анализа научных результатов, полученных в известных публикациях по данному вопросу.

**Изложение основного материала исследования.** В МПА с канонической структурой функция переходов реализуется в форме системы канонических булевых уравнений, по которой проводится синтез схемы формирования переходов (СФП) автомата [1; 2]. Предложенный в работах [3, с. 22; 4, с. 36] принцип операционного преобразования кодов состояний автомата предлагает альтернативный способ реализации функции переходов, заключающийся в следующем. Коды состояний автомата, представляемые двоичными векторами, рассматриваются одновременно как скалярные величины, что позволяет выполнять над ними произвольные арифметико-логические операции. При этом результат выполнения операции над кодом текущего состояния автомата рассматривается как код состояния перехода. Операции, используемые для преобразований кодов состояний, названы в [3, с. 23] операциями

переходов (ОП). В общем случае одна ОП может использоваться для реализации множества переходов МПА [3, с. 23].

Каждая ОП синтезируется в виде отдельного функционального узла. При этом затраты аппаратуры на реализацию схемы узла не зависят (или зависят незначительно) от количества автоматных переходов, реализуемых с помощью данной ОП. В работе [5, с. 150] функциональные узлы всех ОП, используемых для реализации переходов заданного МПА, предлагается объединять в единый структурный блок, называемый операционной частью (ОЧ). Для выбора результата одной из ОП используется мультиплексор, также являющийся частью ОЧ [5, с. 154; 6, с. 26; 7, с. 34]. Выход мультиплексора поступает в регистр памяти (РП) автомата, хранящий код текущего состояния автомата. Выход РП поступает в блок ОЧ в качестве обратной связи [6, с. 26; 7, с. 34]. В работе [5, с. 150] совокупность блоков ОЧ и РП предлагается называть операционным автоматом переходов (ОАП). Анализ структуры ОАП в отношении возможности совместной реализации функциональных узлов проведен в работах [5, с. 153; 7, с. 35].

Использование ОАП в составе МПА порождает новую структуру микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов (МПА с ОАП) [7, с. 35]. Помимо ОАП и схемы формирования микроопераций (СФМО), в данной структуре присутствует дополнительная Z-подсхема, формирующая коды операций переходов для управления мультиплексором в блоке ОЧ. В работе [8, с. 81] показано, что в МПА с ОАП часть микропрограммных переходов может быть реализована каноническим способом по системе булевых уравнений. Это оказывается удобным в том случае, если аппаратные затраты на реализацию данных переходов операционным способом превышают затраты на их реализацию по системе булевых уравнений. Существует возможность реализации всех переходов из некоторого состояния с помощью одной операции переходов [9, с. 14].

В работах [10, 11] выполнена алгебраическая формализация структурной модели МПА с ОАП, в соответствии с которой функция переходов автомата представляется состоящей из множества так называемых частичных функций переходов [10, с. 22; 11, с. 66]. Каждая частичная функция переходов реализует собственное подмножество переходов автомата и вместе с подмножеством состояний образует подалгебру переходов. Совокупность всех подалгебр переходов образуют

алгебру переходов МПА, носителями которой являются состояния и входные сигналы, сигнатурой – функция переходов [10, с. 25; 11, с. 67]. При этом различают абстрактную и структурную алгебры переходов, интерпретирующие абстрактный и структурный автоматы соответственно. Тожественность абстрактного и структурного автоматов в части функции переходов выражается изоморфизмом соответствующих алгебр переходов [11, с. 69].

В работе [11, с. 71] на примере известной структуры автомата на счетчике вводится понятие промежуточной алгебры переходов. Ее сигнатурой является арифметико-логическая операция, носителем – подмножество кодов состояний и входных сигналов в формате аргументов операции сигнатуры. В МПА с ОАП каждая операция переходов и подмножество реализуемых с ее помощью микропрограммных переходов формально представляются промежуточной алгеброй переходов. В работе [12, с. 102] дан ряд обобщений для автомата на счетчике, приводящих к МПА с операционным автоматом переходов.

Возможность использования некоторой операции переходов для преобразования кодов состояний автомата может быть выражена попарным изоморфизмом трех алгебр: абстрактной подалгебры переходов, структурной подалгебры переходов и промежуточной алгебры переходов [13, с. 55]. Математическая модель МПА с ОАП представляется системой подобных изоморфизмов для всех используемых операций переходов [13, с. 56]. Таким образом, синтез МПА с ОАП с алгебраической точки зрения сводится к построению системы изоморфизмов подалгебр переходов и соответствующих промежуточных алгебр переходов.

В работе [14, с. 37] синтез МПА с ОАП предлагается разделять на два этапа: алгебраический синтез автомата и синтез его логической схемы. Под алгебраическим синтезом автомата понимается формирование системы изоморфизмов алгебр в соответствии с математической моделью. Построенную систему изоморфизмов следует считать формальным решением задачи алгебраического синтеза [15, с. 105]. В общем случае для заданного автомата возможно получение множества формальных решений, различающихся используемыми операциями переходов, выбранными кодами состояний, способом разбиения функции переходов на частичные функции и так далее. Подмножество тех формальных решений, при которых аппаратные затраты в логической

схеме МПА с ОАП оказываются меньше, чем в альтернативных структурах МПА, называют множеством эффективных решений задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП. Этап синтеза логической схемы МПА с ОАП состоит в последовательном синтезе отдельных структурных блоков автомата [16, с. 97]. В работе [17, с. 58] рассмотрена возможность реализации функции выходов автомата с использованием операционного подхода.

Наиболее сложно формализуемым является этап алгебраического синтеза автомата. В работе [18, с. 49] отмечена возможность синтеза алгебраических составляющих в различном порядке, что потенциально допускает разработку множества методов алгебраического синтеза МПА с ОАП. Одним из таких методов является полный перебор сопоставления операций переходов кодам состояний [19, с. 71], однако время выполнения полного перебора оказывается неприемлемо большим даже в случае автоматов малой сложности. Более целесообразным является разработка отдельных подходов, которые могут быть использованы в качестве составляющих метода алгебраического синтеза. Такими подходами являются, например, введение дополнительных состояний с целью упрощения реализации переходов операционным способом [20, с. 59] или учет частоты состояний при выборе операций переходов [21, с. 4]. Один из возможных методов алгебраического синтеза МПА с ОАП, учитывающий ряд подобных подходов, предложен в [14, с. 39].

В структуре МПА с ОАП допустимо использование некоторых известных методов оптимизации аппаратных затрат, применяемых к микропрограммным автоматам: замена входных переменных [22 с. 20; 23, с. 36] и уменьшение максимального количества существенных входных переменных

[24, с. 43]. Использование данных методов в структуре МПА с ОАП позволяет в ряде случаев добиться дополнительного снижения аппаратных затрат в логической схеме автомата.

Эффективность микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов по критерию аппаратных затрат, исследованная в работах, может быть определена в сравнении с другими известными структурами МПА (например, с каноническим автоматом [2, с. 89]). В работе [25, с. 114] на основании результатов экспериментальных исследований получены аналитические выражения для численного определения аппаратных затрат в структуре МПА с ОАП. В основу экспериментов положено VHDL-моделирование в базе ПЛИС типа FPGA. Исследование эффективности структур МПА с ОАП показало возможность получения в среднем 30% выигрыша в аппаратных затратах по сравнению с каноническим МПА [26, с. 36].

**Выводы.** Результаты исследования эффективности МПА с ОАП позволяют говорить о достаточной эффективности данного класса МПА и перспективах его практического применения. Анализ рассмотренных публикаций позволяет сформулировать следующие направления исследований в рамках методологии синтеза микропрограммных автоматов с операционным автоматом переходов:

- разработка формализованных методов, позволяющих получить эффективные решения задачи алгебраического синтеза МПА с ОАП;
- использование в МПА с ОАП известных методов оптимизации логических схем цифровых устройств;
- применение принципа операционного преобразования кодов состояний в других классах устройств управления.

#### Список литературы:

1. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов. Москва : Физматгиз, 1962. 476 с.
2. Баранов С.И. Синтез микропрограммных автоматов. Ленинград : Энергия, 1979. 232 с.
3. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Операционное формирование кодов состояний в микропрограммных автоматах. *Кибернетика и системный анализ*. 2011. № 2. С. 21–26.
4. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Организация устройств управления с операционной адресацией. *Управляющие системы и машины*. 2008. № 6. С. 34–39.
5. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Организация операционной части в управляющем автомате с операционным автоматом переходов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ». 2011. № 21 (183). С. 149–156.
6. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Реализация функции переходов микропрограммного автомата на базе операционного автомата. *Управляющие системы и машины*. 2015. № 5. С. 22–29.
7. Бабаков Р.М., Ярош И.В. Операционный автомат переходов. *Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. Красноармійськ : ДВНЗ «ДонНТУ». 2015. № 1 (28). С. 33–40.

8. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Операционный автомат переходов с дополненным множеством операций переходов. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка»*. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ». 2011. № 14 (188). С. 80–84.
9. Бабаков Р.М., Ярош И.В. Формирование кодов операций переходов в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. Красноармійськ : ДВНЗ «ДонНТУ». 2015. Випуск 1 (20). С. 11–16.
10. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Алгебраическая интерпретация микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Кибернетика и системный анализ*. 2016. № 2. С. 22–29.
11. Бабаков Р.М. Промежуточная алгебра переходов в микропрограммном автомате. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2016. № 1. С. 64–73.
12. Бабаков Р.М. Обобщение математической модели микропрограммного автомата на счетчике. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2018. № 1. С. 100–109.
13. Бабаков Р.М. Математическая модель микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. Красноармійськ : ДВНЗ «ДонНТУ». 2016. № 1 (22). С. 54–57.
14. Бабаков Р.М. Алгебраический синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Информационные технологии и компьютерная инженерия*. 2017. № 39. Т. 2. С. 35–41.
15. Бабаков Р.М. Формальное решение задачи алгебраического синтеза микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 2. С. 103–107.
16. Бабаков Р.М. Синтез логической схемы микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 4. С. 96–99.
17. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Операционная реализация функции выходов микропрограммного автомата. *Управляющие системы и машины*. 2017. № 3. С. 57–62.
18. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Структурное представление процесса синтеза управляющих автоматов с операционным автоматом переходов. *Управляющие системы и машины*. 2011. № 3. С. 47–53.
19. Бабаков Р.М. Синтез микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов методом полного перебора. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. № 1. С. 70–74.
20. Бабаков Р.М., Ярош И.В. Использование транзитных состояний в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ». 2016. № 1 (29). С. 56–64.
21. Бабаков Р.М. Урахування імовірності станів у мікропрограмному автоматі з операційним автоматом переходів. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2017. № 2. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/505/500>
22. Babakov R.M. Using of method of replacement of input variables in microprogram finite-state machine with datapath of transitions. *Технологический аудит и резервы производства*. 2017. № 4/2 (36). С. 18–23.
23. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Модификация микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов и заменой входных переменных. *Управляющие системы и машины*. 2017. № 6. С. 35–40.
24. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Уменьшение максимального количества существенных входных переменных в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Управляющие системы и машины*. 2018. № 2. С. 42–50.
25. Бабаков Р.М. Исследование аппаратных затрат в микропрограммном автомате с операционным автоматом переходов. *Радиоэлектроника, информатика, управление*. 2017. № 4. С. 106–115.
26. Баркалов А.А., Бабаков Р.М. Определение области эффективного применения микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов. *Кибернетика и системный анализ*. 2018. № 3. С. 27–37.

## МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СИНТЕЗУ МІКРОПРОГРАМНИХ АВТОМАТІВ З ОПЕРАЦІЙНИМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДІВ

У статті розглядаються відомі підходи та методи побудови мікропрограмних автоматів з операційним автоматом переходів. Проводиться огляд публікацій з питань структурної організації, математичної моделі, алгебраїчного синтезу, підходів до оптимізації та оцінки ефективності даного класу автоматів. Окреслюються напрями та перспективи подальших досліджень.

**Ключові слова:** мікропрограмний автомат, операційний автомат переходів, методологія синтезу, структура, оптимізація апаратних витрат.

**METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE SYNTHESIS OF THE MICROPROGRAMMABLE FINITE-STATE MACHINES WITH DATAPATH OF TRANSITIONS**

*The article discusses the well-known approaches and methods for constructing microprogram finite state machine with datapath of transitions. A review of publications on structural organization, mathematical model, algebraic synthesis, approaches to optimization and evaluation of the effectiveness of this class of finite state machines is carried out. The directions and prospects for further research are considered.*

**Key words:** *microprogram finite-state machine, datapath of transitions, synthesis methodology, structure, hardware expenses optimization.*

УДК 004.9, 91, 94:378.1

**Батурін О.І.**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

**Лифар В.О.**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

**Іванов В.Г.**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

**Лифар О.К.**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

## СТРУКТУРНО-ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОСВІТНЬОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ТА ЯКОСТІ ВИЩОЇ ОСВІТИ В УНІВЕРСИТЕТІ

*У статті наведено структурно-інформаційну модель процесів забезпечення якості освітньої діяльності та якості вищої освіти в університеті. Сформульовано завдання досліджень для вирішення проблем оцінки складників у системі забезпечення вищими навчальними закладами якості освітньої діяльності та якості вищої освіти (системи внутрішнього забезпечення якості).*

**Ключові слова:** інформаційні технології, якість вищої освіти та освітньої діяльності, інженерія програмного забезпечення, бази даних, моделі процесів, інформаційні потоки.

**Постановка проблеми.** Для забезпечення необхідного рівня якості освітньої діяльності та якості вищої освіти та його відповідності сучасними вимогам законодавства [1–12] необхідно знайти дієві методи та засоби, які будуть реалізовані завдяки розробленій інформаційній технології підтримки прийняття рішень, що значно підвищить рівень надання освітніх послуг, реалізує питання інформаційного забезпечення навчального процесу та якості вищої освіти університету.

Запропонована структурно-інформаційна модель забезпечує виконання ст. 16 Закону України «Про вищу освіту» та реалізує систему забезпечення вищими навчальними закладами якості освітньої діяльності та якості вищої освіти (систему внутрішнього забезпечення якості). Така модель може бути представлена різними структурними рівнями: структурою користувачів, структурою програмно-апаратних засобів та структурою інформаційних потоків, об'єднаних в інформаційній технології. Розроблення моделей, методів та програмних засобів інформаційної технології – актуальне науково-технічне завдання, яке реалізується на професійному рівні спеціальностей, таких як «інформаційні технології», «інженерія програмного забезпечення». Вирішення такого завдання та розроблення програмних засобів системи підтримки

прийняття рішень (СППР), які здатні реалізувати ці технології, дає можливість не тільки вдосконалити навчальний процес і дали змогу учасникам навчального процесу впорядкувати інформаційний обмін, а й привести його до необхідного рівня якості та проводити моніторинг якості освітньої діяльності на всіх спеціальностях та якості вищої освіти університету в цілому.

Дана розробка найбільш актуальна для університетів України у зв'язку зі специфікою українського законодавства в галузі освітньої діяльності. Попереднє впровадження університетами міжнародного стандарту ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT) «Система управління якістю. Вимоги» дасть можливість уніфікувати номенклатуру документообігу, уникнути переадресації виконавчих функцій між відділами та сприятиме раціональному функціонуванню системи. Але, враховуючи міжнародний досвід, упроваджений в освітній реформі, СППР може використовуватися також у вищих європейських країнах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Застосування інформаційних технологій для підвищення ефективності організації навчального процесу проаналізовано у працях Н. Косіюка, М. Косіюка, С. Чернишенко, Б. Мокіна, В. Мокіна, О. Воронкіна, Р. Гуревича, В. Крюкова, І. Агєєва, В. Бикова, Ю. Дорошенка, М. Жалдака,

І. Журавльової, В. Сергієнка, О. Єльнікової, Л. Калініної, В. Руденка, Д. Таушана та ін.

У роботах Н. Косіка, М. Косюка та С. Чернишенко [13–15] сформульовано основні рекомендації побудови інформаційної системи електронного університету (ІСЕУ). Запропонована структурна модель даної системи забезпечує організацію роботи між основними структурними підрозділами університету. Усі підрозділи мають доступ до системи документообігу, яка забезпечує можливість формування документів, відстеження термінів виконання й контроль над виконанням. Також усі робочі місця в системі мають можливість обміну повідомленнями між користувачами та формують відповідні звіти, документацію й аналітику. Нині враховується підпорядкованість підрозділів, наприклад деканати мають доступ до інформації відповідних кафедр, ректор і проректори – до інформації деканатів і т. п. На основі інформації про діяльність університету (звіти, аналітика) керівництво ухвалює обґрунтовані рішення й за допомогою наказів керує діяльністю університету. ІСЕУ забезпечує взаємодію із зовнішніми стосовно університету інформаційними системами, зокрема із системами МОНУ (Education, ЄДЕБО та ін.), із різними фінансовими органами. Крім спеціалізованих робочих місць/ролей, у системі передбачене робоче місце/роль без спеціалізованих функцій для співробітника будь-якого підрозділу, щоб забезпечити авторизований доступ до загальносистемних функцій, таких як документообіг й обмін повідомленнями.

У роботі Б. Мокіна та В. Мокіна [16] розглянуто модель автоматизованої інформаційної системи (АІС) моніторингу управління навчальним процесом магістерської підготовки. Розроблення автоматизованої АІС магістерської підготовки полягає у скоординованій взаємодії програмних модулів, які реалізовані з використанням веб-технологій, а також забезпечують комплексне використання різними підрозділами закладу вищої освіти.

Реалізація моделі АІС передбачає розроблення моделі структурного розподілу інформаційного й алгоритмічного забезпечення між підсистемами під час створення загального банку даних. До складу загального банку даних входять: інформація про суб'єкти АІС – БД викладачів, магістрантів і претендентів; описи характеристик навчальних і наукових здобутків магістрантів – БД наукового і навчального рейтингу; інформація довідкового характеру – БД адресної прив'язки і БД імен; БД структури університету; БД навчальних планів, що містить опис дисциплін планів спеціальнос-

тей; БД розподілу навантаження; БД розкладу занять і розкладу сесії; БД заліково-екзаменаційних листків і відомостей; БД державної екзаменаційної комісії. Розроблення засобів моніторингу й управління навчальним процесом здійснюється за використання автоматизованої системи інформаційного обліку даних і на основі застосування програмних засобів – Invision Power Board, системи керування базою даних MySQL, мови PHP, веб-сервера Apache.

У досліджених АІС [13–20] під час розроблення моделі використовуються особливості того закладу вищої освіти, для якого конкретно розроблялися, при цьому динамічні зміни, які нині відбуваються в освітній галузі, у тому числі надання автономії закладам вищої освіти, сприяють унікальності кожної АІС. Тому практично неможливо запровадження єдиної АІС на всьому освітньому просторі, виняток становлять базові окремі модулі, які гарантують виконання вимог нормативно-правової бази МОНУ щодо якості освітньої діяльності та якості вищої освіти, які наведені різними кількісними параметрами (такими як виконання: Ліцензійних умов провадження освітньої діяльності; Критерії надання та підтвердження статусу національного закладу вищої освіти; Державних вимог до акредитації напряму підготовки, спеціальності та вищого навчального закладу [8–10]).

У розглянутих АІС не приділяється належної уваги моніторингу процесу підготовки фахівців, оцінюванню рейтингу науково-педагогічних працівників та студентів, внутрішнього та зовнішнього моніторингу якості вищої освіти університету. Відсутність системи регулярного моніторингу якості освітньої діяльності та якості вищої освіти, яка б забезпечувала постійний контроль над учасниками навчального процесу та виконанням прийнятих адміністративних рішень для забезпечення та досягнення необхідного рівня якості освіти, значно б поліпшило якість підготовки здобувачів вищої освіти.

**Постановка завдання.** Для забезпечення функціонування інформаційної підтримки процесу надання освітніх послуг в університеті необхідно на першому етапі провести комплексний аналіз сучасного стану інформаційних технологій, програмних засобів та методів підтримки прийняття рішень під час надання освітніх послуг у сфері вищої освіти; дослідити та провести аналіз нормативної бази і законодавства України, що стосується забезпечення якості освітньої діяльності та якості вищої освіти.



На другому етапі необхідно розробити моделі й методи управління освітнім процесом, структурні моделі інформаційних потоків, які виникають під час роботи таких моделей; розробити моделі та методи роботи з інформацією на всіх рівнях ієрархічної структури користувачів і забезпечити їх синхронізацію з інформаційними потоками; провести формалізацію процесів інформаційного обміну та розробити інформаційну модель системи підтримки прийняття рішень під час управління процесом надання освітніх послуг.

На третьому етапі необхідно розробити технічні вимоги до створення програмних засобів для реалізації завдань СППР; розробити програмні засоби СППР; провести верифікацію і валідацію пакета програм, визначити сферу застосування і визначення розроблених програмних засобів.

На четвертому етапі – удосконалити методи управління навчальним процесом і методи при-

йняття рішень відносно якості освітньої діяльності та якості вищої освіти та факторів які на них впливають.

Завдання розробки – розв’язання задач із визначення поточного рівня якості освітньої діяльності та якості вищої освіти, яке можливе шляхом розроблення методів порівняльного аналізу показників якості та успішності здобувачів вищої освіти, кваліфікаційного рівня науково-педагогічних працівників, забезпечення якісного наповнення пакетів навчально-методичних комплексів дисциплін та рівня виконання нормативних вимог у сфері вищої освіти.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На основі проведеного аналізу і вивчення вимог актуальної нормативної бази можна запропонувати структурно-інформаційну модель процесів забезпечення якості освітньої діяльності та якості вищої освіти в університеті (рис. 1).

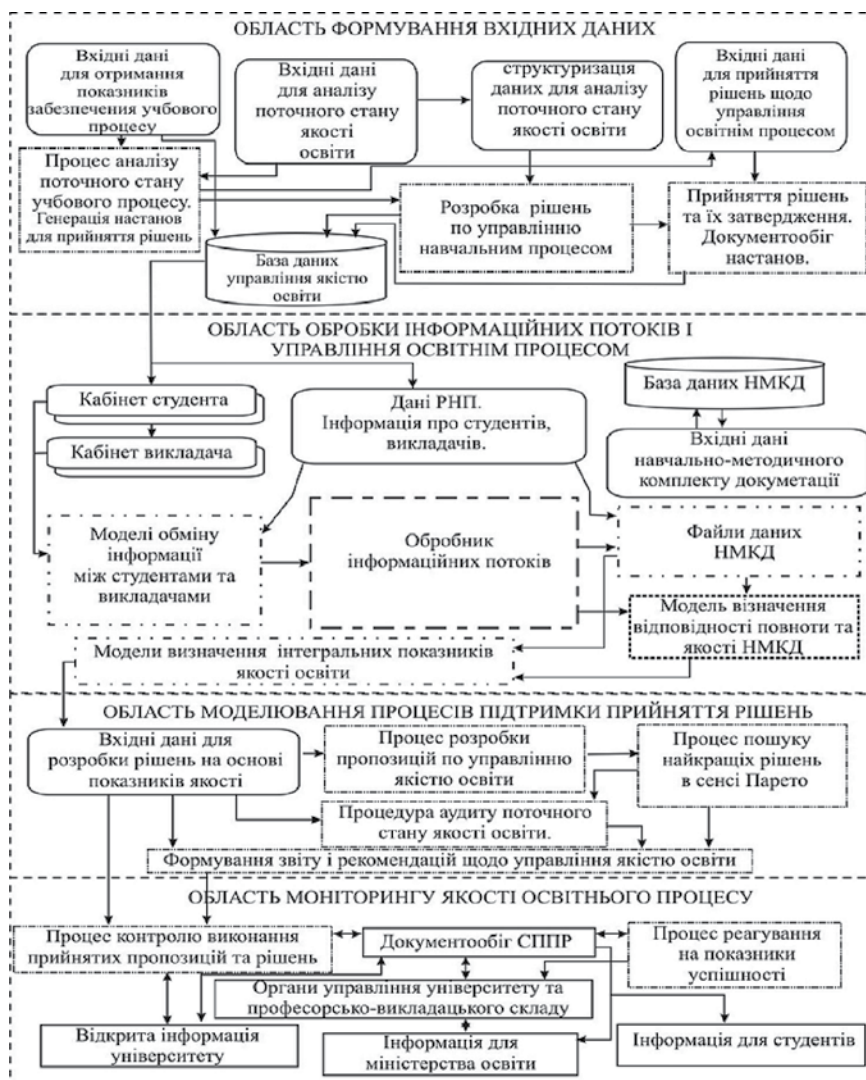


Рис. 1. Структурно-інформаційна модель процесів забезпечення якості освітньої діяльності та якості вищої освіти в університеті

Загальні інформаційні процеси розподіляються на декілька сфер:

– сфера формування вхідних даних призначена для збору та обробки вхідних даних і структуризації даних для аналізу поточного стану якості освіти, що дають змогу провести моделювання визначення інтегральних показників якості освіти. На цьому етапі реалізуються методи аналізу поточного стану навчальних процесів і розроблення первинних рішень та пропозицій щодо управління навчальним процесом. У результаті поповнюється база даних управління якістю вищої освіти університету;

– сфера обробки інформаційних потоків дає змогу застосувати вхідні дані, моделі обміну інформацією, визначення відповідності повноти та якості НМКД (навчально-методичного комплексу дисциплін) для визначення динамічних показників якості освітньої діяльності науково-педагогічних працівників;

– сфера моделювання процесів підтримки прийняття рішень забезпечує процеси розроблення звіту і вироблення рекомендацій та вимог до корегування освітнього процесу. На цьому етапі вибираються рішення, оптимальні в сенсі Парето, що забезпечують аудит поточного стану освітнього процесу;

– сфера моніторингу призначена для контролю виконання прийнятих рішень, висвітлення освітньої діяльності та підтримки системи управління якістю освітньої діяльності та якістю вищої освіти університету.

На відміну від існуючих інформаційних технологій, моделей і методів підтримки рішень щодо якості освіти пропонується авторами інформаційна технологія передбачає комплексне моделювання дій управління освітнім процесом шляхом послідовної формалізації, порівняльного аналізу та розроблення коригуючих дій, спрямованих на приведення поточного стану якості освіти до відповідності вимогам нормативно-правової бази. При цьому синтез моделей здійснюється шляхом поєднання формальних методів математичної логіки і математичних моделей розвитку освітньої діяльності, що відбуваються в часі в певній послідовності.

При цьому повний набір об'єднаних синтезованих моделей представляється як орієнтований дієвий граф. Орієнтований граф визначається як  $G = \langle Ev, \rightarrow, S \rangle$ , де  $Ev$  – множина подій (станів, невідповідностей, змін та інших подій

освітньої діяльності);  $\rightarrow$  – множини відношень, що визначають причинно-наслідковий зв'язок, що формують ребра графа станів;  $S$  – сигнатура графа, яка містить множини інформаційних операцій із даними баз даних. Окрім того, використовуються відношення наслідування, в якому враховується часова структура подій  $\rightarrow^{dt}$ , що встановлює бінарне відношення логічної ситуації виду:  $f(\alpha) \rightarrow^{dt} event$ .

Таке відношення враховує зв'язок між функцією висловлювань «причини» (вхідних станів якості та впливаючих рішень щодо її поліпшення)  $f(\alpha)$  і пов'язаною з ними наступною за деякий проміжок часу  $dt$  подією  $event$  (що відображує кінцевий стан якості освіти).

Модель дає змогу виконати завдання другої та третьої сфер (рис. 1) інформаційної моделі процесів забезпечення необхідного рівня якості освітньої діяльності на основі порівняльного аналізу освітніх процесів та їх показників.

**Висновки.** Запропоновані авторами методи й моделі формування вихідних даних обробки інформаційних потоків, процесів прийняття рішень і моніторингу поточного стану процесу представлення освітніх послуг погоджені концептуально, формалізовані до рівня, підтвердженого алгоритмізацією в системах чіткої логіки. Такий підхід дає змогу розробити технічні вимоги та програмні засоби, повною мірою реалізуючи функції інформаційної технології СППР для їх використання усіма учасниками навчального процесу.

Запровадження такої СППР у робочі процеси університету дає змогу не тільки значно збільшити функціонал «без паперових» технологій інформаційного обміну та збільшення якості освітніх послуг, а й привести (на основі порівняльного аналізу) показники якості освіти до нормативно необхідного рівня.

Побудова програмних засобів із багаторівневою структурою баз даних користувачів та засобів уведення-виведення інформації дає змогу не тільки систематизувати динамічні показники освітнього процесу, а й підвищити його надійність збереження і функціональності.

Розроблення пакета прикладних програм СППР у наведеній авторами концепції забезпечує гнучкість окремих компонентів, можливостей розширення системи і взаємозамінність окремих блоків та засобів відображення даних.

Список літератури:

1. Конституція України. *Офіційний вісник України*. 2010. № 72/1. Спеціальний випуск. 15 с. Ст. 2598.
2. Згуровський М.З. Болонський процес: головні принципи та шляхи структурного реформування вищої освіти України. Київ : Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т», 2006. 543 с.
3. Національна стратегія розвитку освіти в Україні на 2012–2021 роки URL: <https://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/344/2013> (дата звернення: 04.03.2019).
4. Закон України «Про освіту». *Офіційний вісник України*. 2017. № 78. 7 с. Ст. 2392. Код акта 87438/2017.
5. Закон України «Про вищу освіту». *Офіційний вісник України*. 2014. № 63. 7 с. Ст. 1728. Код акта 73423/2014.
6. Закон України «Про наукову і науково-технічну діяльність». *Офіційний вісник України*. 2016. № 2. 19 с. Ст. 40. Код акта 80089/2015.
7. Положення про акредитацію вищих навчальних закладів і спеціальностей у вищих навчальних закладах та вищих професійних училищах : Постанова Кабінету Міністрів України. *Офіційний вісник України*. 2001. № 32. 233 с. Ст. 1491. Код акта 19711/2001.
8. Про затвердження Ліцензійних умов провадження освітньої діяльності : Постанова Кабінету Міністрів України. *Офіційний вісник України*. 2016. № 7. 23 с. Ст. 345. Код акта 80480/2016.
9. Порядок надання закладу вищої освіти статусу національного, підтвердження чи позбавлення цього статусу : Постанова Кабінету Міністрів України. *Офіційний вісник України*. 2017. № 99. 34 с. Ст. 3031. Код акта 88234/2017.
10. Про затвердження Державних вимог до акредитації напряму підготовки, спеціальності та вищого навчального закладу : Наказ Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України. *Офіційний вісник України*. 2012. № 52. 126 с. Ст. 2100. Код акта 62446/2012.
11. Про затвердження уніфікованих форм актів, що складаються за результатами проведення планових (позапланових) заходів державного нагляду (контролю) у сфері освітньої діяльності закладів освіти, що підлягає ліцензуванню» : Наказ Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України. *Офіційний вісник України*. 2017. № 68. 59 с. Ст. 2056. Код акта 86975/2017.
12. ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT) Система управління якістю. Вимоги : Наказ ДП «УкрНДНЦ» від 31 грудня 2015 р. № 221 з 2016.07.01.
13. Косіюк Н.Н., Мазарчук А.Ю., Белевский К.Э. Интегрированная информационная система «Электронный университет». *Analysis of the state of university management information systems in project partner countries. Brochure 2 / under the editorship of S. V. Chernyshenko, V. O. Lyubchak, K. I. Kyrychenko. Sumy State University, 2013. С. 62–90.*
14. Косіюк М.М., Мазарчук А.Ю., Більовський К.Е. Університетський менеджмент: інформаційна підтримка і комп'ютеризація – досвід Хмельницького національного університету. *Actual problems of specialists in ICT/ Conference Proceedings*. Sumy : Sumy State University, 2013. С. 48–55.
15. Методологические основы создания, внедрения и развития интегрированной информационной системы управления университетом / под ред. С.В. Чернышенко, Ю.И. Воротниченко. Сумы : СГУ, 2015. 343 с.
16. Мокін В.Б., Бевз С.В., Бурбело С.М. Розробка та впровадження систем документообігу і менеджменту навчального процесу магістерської підготовки. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2006. № 2. С. 5–12.
17. Воронкін О.С. Розвиток інформаційно-комунікаційних технологій навчання студентів вищих навчальних закладів України у 90-Х роках ХХ ст. – на початку ХХІ ст. *Інформаційні технології в освіті*. 2014. Вип. 20. С. 99–116. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ITZN\\_2014\\_39\\_1\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ITZN_2014_39_1_4).
18. Гуревич Р.С., Кадемія М.Ю., Козяр М.М. Інформаційно-комунікаційні технології в професійній освіті ; за ред. член-кор. НАПН України Р.С. Гуревича. Львів, 2012. 506 с.
19. Крюков В.В., Шахгельдян К.И. Корпоративная информационная среда вуза: методология, модели, решения. Владивосток : Дальнаука, 2007. 308 с.
20. Информационная управляющая система МГТУ им. Н.Э. Баумана «Электронный университет»: концепция и реализация / Т.И. Агеева и др. ; под ред. И.Б. Федорова, В.М. Черненко. Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 376 с.

**СТРУКТУРНО-ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
И КАЧЕСТВА ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ В УНИВЕРСИТЕТЕ**

*В статье приведена структурно-информационная модель процессов обеспечения качества образовательной деятельности и качества высшего образования в университете. Сформулированы задачи исследований для решения проблем оценки составляющих в системе обеспечения высшими учебными заведениями качества образовательной деятельности и качества высшего образования (системы внутреннего обеспечения качества).*

**Ключевые слова:** *информационные технологии, качество высшего образования и образовательной деятельности, инженерия программного обеспечения, базы данных; модели процессов, информационные потоки.*

**STRUCTURAL-INFORMATIONAL MODEL OF PROCESSES  
FOR ENSURING THE QUALITY OF EDUCATIONAL ACTIVITY  
AND THE QUALITY OF HIGHER EDUCATION AT THE UNIVERSITY**

*The structural-informational model of quality assurance processes of educational activities and the quality of higher education at the university is presented. Research tasks to solve the problems of evaluation components in the system of providing higher education institutions the quality of educational activities and the quality of higher education (internal quality assurance) are formulated.*

**Key words:** *quality of educational activity, higher education quality, information technologies, software engineering, science, databases, process models, information flows.*

УДК 004.925.8

**Вяткин С.И.**Институт автоматики и электрометрии  
Сибирского отделения Российской академии наук**Романюк А.Н.**

Винницкий национальный технический университет

**Романюк О.В.**

Винницкий национальный технический университет

**Лысенко Е.С.**

Винницкий национальный технический университет

## ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННЫЕ ОПЕРАЦИИ НАД СВОБОДНЫМИ ФОРМАМИ

*В работе предложен метод вычисления булевых операций (объединения, пересечения, разности), применяемых к твердым телам свободной формы, ограниченными поверхностями свободных форм. Разработаны алгоритмы генерации поверхности с несколькими разрешениями, ограничивающей объем.*

**Ключевые слова:** теоретико-множественные операции, свободные формы, функции возмущения, объемы.

**Постановка проблемы.** Булевы операции – естественный способ построения сложного твердого тела объекта из простых примитивов. Такой подход очень распространен в автоматизированном геометрическом дизайне, где много искусственных объектов могут строиться из простых частей, таких как цилиндры, прямоугольные блоки и сферы. Некоторые вычислительные представления твердых тел замкнуты относительно логических операций. Это означает, что результат логической операции не может быть представлен точно в большинстве случаев. Один из путей избежания этих проблем заключается в использовании дерева логических операций в качестве представления объектов и реализации различных алгоритмов непосредственно для такого представления. Такой подход называется конструктивной твердотельной геометрией (CSG) [1]. Однако для многих приложений CSG – не самый эффективный или соответствующий метод. Чаще всего используются граничные представления (B-гер) твердых тел. И булевы операции должны быть реализованы в B-гер базе. Такое применение довольно сложно для высшего порядка B-гер, так как требует пересечений параметрических поверхностей, разделяя их на куски при строительстве новых поверхностей из этих частей. Существующие системы обычно рассматривают B-Rep как набор обрезанных участков сплайна, разделяющего границы. Границы из

отдельных патчей часто совпадают лишь приблизительно. Каждая операция пересечения ведет к более сложным и трудно применимым обрезкам кривых. Ее трудно применить для гладких деформаций к результирующим моделям. С особой тщательностью должны быть приняты меры, чтобы избежать трещин и т. д. Элементарная операция, необходимая для этого представления поверхности, – пересечение двух обрезанных NURBS патчей. Однако это является сложной проблемой. В результате логические операции часто выполняются медленно и не полностью надежны. При этом отличные результаты достигаются с помощью сплошного твердотельного моделирования.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Результаты булевых операций на B-Rep твердых тел показаны в работе [2]. Использование специальной схемы комбинированного деления описано в [3] для представления кривой пересечения. Существует обширная литература по твердотельному моделированию с B-Rep [4; 5].

В этой статье мы представляем новый подход к вычислению результата булевых операций над свободными формами на основе функций возмущения.

**Изложение основного материала исследования.**

**Свободные формы объектов**

*Алгебраическим неравенством второй степени (с тремя неизвестными  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) называется всякое неравенство вида:*

$$F(x, y, z) = A_{11}x^2 + A_{22}y^2 + A_{33}z^2 + A_{12}xy + A_{13}xz + A_{23}yz + A_{14}x + A_{24}y + A_{34}z + A_{44} \geq 0,$$

где  $x, y$  и  $z$  – пространственные переменные. Можно записать это неравенство в матричном виде:

$$(x \ y \ z \ 1)^* \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12}/2 & A_{13}/2 & A_{14}/2 \\ A_{12}/2 & A_{22} & A_{23}/2 & A_{24}/2 \\ A_{13}/2 & A_{23}/2 & A_{33} & A_{34}/2 \\ A_{14}/2 & A_{24}/2 & A_{34}/2 & A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \geq 0.$$

На базе квадратик строится класс свободных форм с использованием функций возмущения.

Предлагается описывать сложные геометрические объекты, задавая функцию отклонения (второго порядка) от базовой квадратки в виде (1).

Свободная форма есть композиция базовой квадратки и возмущения

$$F'(x, y, z) = F(x, y, z) + \sum_{i=1}^N R_i(x, y, z),$$

где функция возмущения  $R(x, y, z)$  находится следующим образом:

$$R_i(x, y, z) = \begin{cases} Q_i^3(x, y, z), & \text{if } Q_i(x, y, z) \geq 0 \\ 0, & \text{if } Q_i(x, y, z) < 0 \end{cases},$$

где  $Q(x, y, z)$  – возмущающая квадратика.

При решении описывающей функции в виде неравенства  $F(X) \geq 0$  можно визуализировать не только поверхность, но и внутреннюю структуру объекта.

### Теоретико-множественные операции

Примитивы можно комбинировать с помощью трехмерных теоретико-множественных операций, таких как объединение, логическая сумма (соединение двух объектов –  $A \cup B$  или  $(A+B)$  – объединение множеств  $A$  и  $B$ ). Пересечение, логическое произведение (выделение общего подмножества –  $A \cap B$  или  $(AB)$  – множества  $A$  и  $B$  имеют общую часть, пересекаются). Разность (взятие всего первого объекта за исключением тех его частей, которые являются общими со вторым объектом –  $A-B$ ).

Для того чтобы создать сложную сцену, необходимо в ней описать какое-то определенное количество примитивов, необходимых для конкретной задачи. Отображаемый объект, с которым алгоритм растеризации осуществляет взаимодействие посредством запросов, представляет собой всю трехмерную сцену, поэтому геометрическая модель должна позволять конструировать объекты и их композиции неограниченной сложности. Достигается это в первую очередь применением булевых операций объединения и пересечения. В описываемой системе визуализации определен объект особого вида, осуществляющий логические операции над объектами любых видов, поэтому вся сцена представляет вид дерева, каждый узел которого является объектом-конструктором, осуществляющим логические операции над своими потом-

ками, а вершинами дерева являются примитивы, используемые системой. В момент, когда растровый алгоритм обращается с каким-либо запросом к объекту-конструктору, этот объект обращается к своим потомкам, преобразует полученный результат, и выдает соответствующий ответ на запрос. При этом потомком может являться как примитив, так и другой объект-конструктор. При применении геометрических операций, поворотов, перемещений, масштабирования к объекту-конструктору он производит все эти операции со своими потомками, а в случае инвертирования изменяет еще свою булеву функцию.

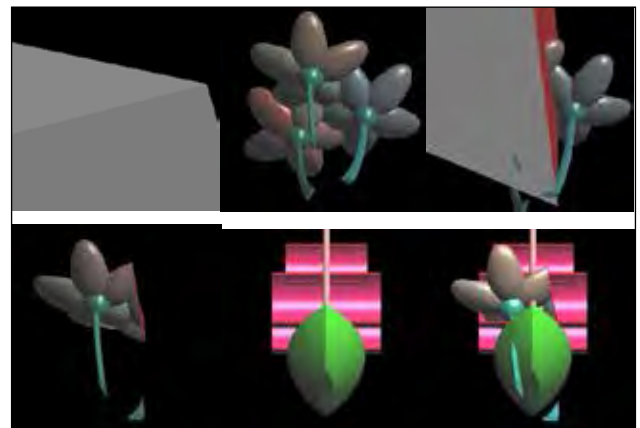


Рис. 1. Теоретико-множественные операции над объектами

### Адаптированный алгоритм визуализации

Для простоты понимания будем считать, что сцена находится в единичном трехмерном кубе (рис. 2). Перспектива рассматриваться не будет ввиду того, что она сводится к переходу в другую систему координат. Так как пирамида видимости будет представлять собой куб в новой системе координат, поэтому опустим начальные преобразования и уделим больше внимания основной части алгоритма. Будем считать, что наблюдатель смотрит вдоль оси  $Z$ . Необходимо получить проекцию сцены на плоскость  $XY$ . Проекция должна представлять собой конечный набор значений, поэтому весь куб будет делиться на «брусочки» так, чтобы каждый брусок соответствовал пикселу на изображении. Каждый из брусочков будет делиться вдоль оси  $Z$ , образуя набор вокселей (рис. 3). Так как размеры брусочка в плоскости  $XY$  значительно меньше, чем в направлении оси  $Z$ , брусок можно рассматривать как луч. Таким образом, получим функцию плотности вдоль луча, которая зависит от одной переменной. Задача будет состоять в нахождении первой точки, в которой функция обращается в ноль. Найдя такую точку для каждого луча, будет известна глубина кадра. Данными

приближениями задача сводится к задаче отслеживания лучей. Далее в каждом пикселе можно вычислить нормаль. А имея данные о глубине и нормали в каждом пикселе, можно использовать модель локального освещения. В итоге получится изображение гладкого объекта с учетом освещения. Главной частью работы является эффективное нахождение первого пересечения луча с поверхностью. Данная задача напоминает задачи визуализации объемных данных, которые часто применяются, например, в томографии. В подобных задачах задана функция плотности. Основным отличием является то, что в подобных задачах мы имеем дело с дискретными данными. А в нашем случае есть аналитически заданная функция плотности. Это позволяет более эффективно осуществлять поиск. Основным отличием адаптированного метода бинарного деления объектного пространства является отсутствие четверичного деления. Куб делится на части в плоскости XY соответственно пикселям на изображении.

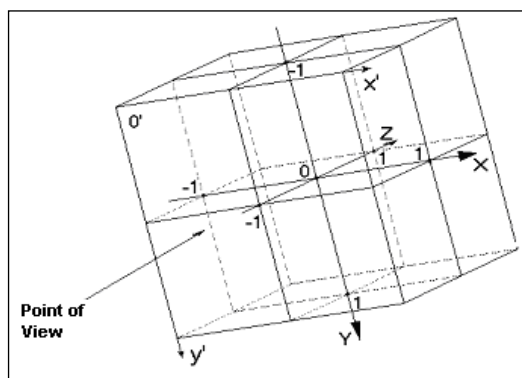


Рис. 2. Единичный куб

Основным отличием адаптированного метода бинарного деления объектного пространства является отсутствие четверичного деления. Куб делится на части в плоскости XY соответственно пикселям на изображении.

Во второй части метод остается прежним. В этом случае уменьшение времени на визуализацию достигается за счет эффективного использования вычислительных ресурсов графического акселератора.

#### Описание приложения с использованием NVIDIA CUDA

Для реализации была использована Compute Unified Device Architecture (CUDA) от компании NVIDIA. CUDA – это модель параллельного программирования вместе с набором программных средств, которая позволяет реализовывать программы на языке C для исполнения на графическом акселераторе.

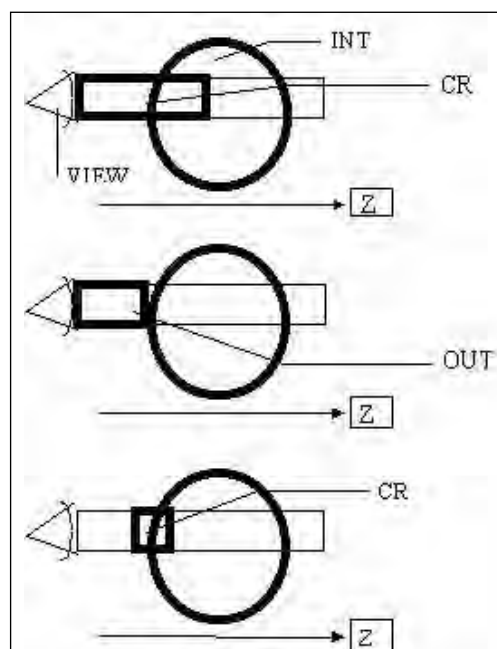


Рис. 3. Бинарное деление луча для вычисления пересечения луча с поверхностью

Достоинством CUDA является и то, что скомпилированная программа будет выполняться на различных графических акселераторах. И результат выполнения будет одинаковый, даже несмотря на то, что у них может быть различное число потоковых мультипроцессоров.

Вернемся к анализу метода. На первых шагах деления куба очень сложно обеспечить параллельную обработку данных, и это потребует применения синхронизации. А в среднем выигрыш в скорости обработки будет меньше, чем накладные расходы, связанные с усложнением модели для дальнейшей обработки, и далеко не все вычислительные ресурсы будут использованы. Теперь рассмотрим деление со стадии, когда куб разбит на достаточное количество частей так, чтобы вычислительные процессоры не простаивали. Первая проблема, с которой мы столкнемся, будет состоять в том, что у разных графических акселераторов разное количество процессоров, и надо будет выбирать во время исполнения оптимальную стадию, с которой начинать работать. Таким образом, можно частично избавиться от проблемы с неиспользуемыми вычислительными ресурсами. Но остается задача балансировки. В этой части вычислений повышение производительности достигается за счет того, что какие-то части будут отброшены на раннем этапе деления куба. Если убрать из рассмотрения какую-нибудь часть пространства, возможно, освободятся вычислительные ресурсы. Но тогда встает задача балансировки. И накладные расходы на ее решение будут превосходить выигрыш в производительности от этой процедуры. Поэтому было принято решение отказаться от четверичного деления кубического

пространства в методе адаптированном для графических ускорителей.

В адаптивном методе используется большое количество вычислительных процессоров, одновременно будет происходить проверка сразу нескольких лучей. А в большей части графических акселераторов, поддерживающих CUDA, не менее ста двадцати восьми скалярных вычислительных ядер. Следовательно, будет отбрасываться достаточно большая часть куба. Стоит заметить, что в последовательном варианте (исходном методе), чтобы отбросить часть куба вблизи с объектом, необходимо поделить рассматриваемую область на более мелкие части. В параллельном варианте это не будет иметь значения, и большая часть будет сразу отброшена.

Как уже упоминалось, во второй стадии метода (двоичное деление) принцип работы последовательного и параллельного вариантов практически не отличается. Отличие лишь в способе задания объектов. В последовательном варианте объекты задавались в виде иерархической модели. То есть в качестве возмущения мог быть другой объект, у которого есть свои возмущения. В адаптивном методе возмущения задаются явно в виде квадрик. Это обусловлено тем, что при написании ядер нельзя использовать рекурсию. Несмотря на это, разнообразие форм, которые можно задать, не меньше чем с использованием иерархического представления. Разница состоит только в удобстве использования. Иерархическое представление является более естественным для такого метода задания объектов.

При реализации учитывалось влияние скорости работы с памятью. Максимально использованы регистры, потому что это самый быстрый вид доступной памяти. Следующая по скорости – совместно используемая память. Во всех остальных случаях используется общая память графического акселератора. Было реализовано приложение, которое визуализирует свободные формы, заданные квадратами с возмущениями на графическом акселераторе. В функции графического акселератора входили расчет глубины кадра, нормалей и освещения. Центральный процессор (ЦПУ или CPU) использовался для геометрических преобразований. Для отображения изображения использовалась DirectX. Тестирование производилось на процессоре Intel Core2 CPU E8400 3.0 GHz, GPU 9800 GT и 470 GTX.

**Выводы.** Научной областью, к которой относится данная работа, является объемно-ориентированное геометрическое моделирование функционально заданных объектов. Областью практического приложения результатов работы является создание интерактивных графических систем объемной визуализации, САПР, 3D Web-визуализация и т. д. В работе представлены свободные формы на базе аналитических функций возмущения. Свободные формы (квадратики) с функциями возмущения обладают достоинством сплайнового представления поверхностей – высокой степенью гладкости, но главной их отличительной чертой является произвольность формы при небольшом количестве функций возмущения.

#### Список литературы:

1. Hoffmann C. M. Geometric and solid modeling: an introduction. San Mateo, California: Morgan Kaufmann, 1989.
2. Litke N., Levin A., Schroder P. Trimming for subdivision surfaces. Technical report, Caltech, 2000.
3. Levin A. Combined subdivision schemes for the design of surfaces satisfying boundary conditions. *Computer Aided Geometric Design*, 16(5):345–354, 1999.
4. Agrawal A., Requicha A. A paradigm for the robust design of algorithms for geometric modeling. *Computer Graphics Forum*, 13(3):33–44, 1994.
5. Rossignac J., Requicha A. Solid modeling. In J. Webster, editor, *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*. John Wiley and Sons, 1999.

#### ТЕОРЕТИКО-МНОЖИННИ ОПЕРАЦІЇ НАД ВІЛЬНИМИ ФОРМАМИ

У роботі запропоновано метод обчислення булевих операцій (об'єднання, перетинання, різниці), що застосовуються до твердих тіл вільної форми, обмежених поверхнями вільних форм. Розроблено алгоритми генерації поверхні з кількома дозволами, що обмежує об'єм.

**Ключові слова:** теоретико-множинні операції, вільні форми, функції збурення, об'єми.

#### THEORETICAL AND MULTIPLE OPERATIONS OVER FREE FORMS

The paper describes a method for calculating Boolean operations (combinations, crossings, differences) applied to solids of free form, bounded surfaces of free forms. The algorithms of surface generation with several resolutions limiting the volume are presented.

**Key words:** multiple-theoretical operations, free forms, functions of disturbances, volumes.



УДК 004.3:621.3

**Зленко С.М.**

Вінницький національний технічний університет

**Прудіус П.Г.**

Вінницький національний технічний університет

**Барановський Д.М.**

Вінницький національний технічний університет

**Паламарчук М.І.**

Вінницький національний технічний університет

## АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА УПРАВЛІННЯ ГЛІКЕМІЧНИМ ПРОФІЛЕМ ХВОРОГО НА ЦУКРОВИЙ ДІАБЕТ

*Метою статті є розроблення апаратно-програмного комплексу для моніторингу та управління глікемічним профілем хворого, а також його структурної схеми. На відміну від традиційної інсуліно-терапії і «штучної бета-клітини» апаратно-програмний комплекс являє собою інтелектуальну біотехнічну систему, що відповідає принципу ситуативності, забезпечує безперервний моніторинг глікемічного профілю, формує оптимальні керуючі впливи за принципом біологічного зворотного зв'язку.*

**Ключові слова:** глікемічний профіль, цукровий діабет, постглікемічна гіперглікемія, глюкоза.

**Постановка проблеми.** Сучасні підходи до моніторингу функціонального стану хворих на цукровий діабет (ЦД) базуються на технічних засобах, в основу яких покладено один із двох підходів до контролю рівня цукру в крові (РЦК): точкові вимірювання рівня цукру в крові за допомогою глюкометрів (self-blood glucose monitoring – SBGM) і тривалий моніторинг цукру в крові за допомогою систем безперервного моніторингу рівня цукру в крові (Continuous Glucose Monitoring Systems – CGMS). У першому випадку точкові вимірювання проводяться кілька разів протягом дня (як правило, вранці натщесерце і через годину після кожного прийому їжі), а у другому – контроль рівня цукру проводять кожні п'ять хвилин [1].

Для здійснення безперервного моніторингу та управління глікемічним профілем необхідно забезпечити контроль низки показників для оцінки стану пацієнта із цукровим діабетом, найбільш суттєвим з яких є РЦК. Контролю можуть також підлягати інші показники, такі як рівень артеріального тиску (АТ); рівень фізичної активності, який вимірюється за допомогою непрямих методів; частота серцевих скорочень (ЧСС); рівень кетонурії та ін.

Сюди також слід додати суто клінічні вимірювання, передусім глікированого гемоглобіну HbA1C, показників орального глюкозо-толерантного тесту (OGTT), аналізу крові та ін. [1].

Високі ризики, які пов'язані з можливою непрацездатністю технічної системи, зумовлюють підвищені вимоги до медичних систем моніторингу. Зокрема, все більше уваги звертається на питання кібербезпеки [2], коли всі елементи системи, що розробляється, повинні відповідати необхідним вимогам безпеки, і зокрема, вимогам Закону «Про захист персональних даних» [2].

Аналіз способів, типів управління, ступеня впливу зворотних зв'язків та проблем «стиківки» зовнішніх технічних систем управління дає змогу вважати, що: технічна частина апаратно-програмного комплексу (АПК) працює в умовах неповної інформації, коли, по-перше, неможливо виміряти всі необхідні для ефективного управління станом показники; по-друге, частина показників вимірюється в безперервному режимі, а частина тільки в дискретному; по-третє, практично неможливо вимірювати в єдиній системі показників швидкості зміни більшості різних за походженням показників [4].

Своєю чергою, це призводить до неможливості застосування одних і тих самих критеріїв якості управління в різних контурах. Тому виникає необхідність використовувати, так звані, узгоджені критерії технічних систем управління: стійкість перехідного процесу; мінімальний час досягнення «бажаного» результату; мінімальні втрати речовини та енергії в системах управління; мінімальні

відхилення від заданої траєкторії і поєднання значимих критеріїв [4].

Будь-яка біологічна система, у т. ч. система регуляції цукру в крові, особливістю якої є гормональний механізм управління, належить до складних систем, оскільки включає велику кількість підсистем із багатьма зв'язками і функціями, що зумовлює велику кількість можливих її станів. Тому під час дослідження таких систем необхідно враховувати множину чинників, що безперервно змінюються, активно впливаючи на систему або підсистему [5].

Наявність великої кількості параметрів, що описують біологічну систему, ускладнює, а іноді й унеможлиблює їх одночасну реєстрацію для отримання інформації про поточний стан системи. З іншого боку, відсутність достатньої кількості характеристик стану і функцій біологічної системи призводить до необхідності визначення впливу зовнішніх чинників, простору значимих діапазонів інформативних ознак, які оцінюють стан здоров'я пацієнта з конкретною патологією.

#### Виклад основного матеріалу дослідження.

Такий простір можна розглядати як сукупність двох базових підпросторів: першого, що характеризує особливості метаболізму глюкози пацієнта (рівень цукру або глюкози; параметри їжі; параметри і дози інсуліну; рівні фізичного навантаження; оцінку сну і рівень кетонурії), і другого, який визначає фізичний або функціональний стан пацієнта (сигнали серцево-судинної, дихальної, центральної нервової, вегетативної систем і сигнали для оцінювання фізичної активності хворого).

Для отримання повної інформації про стан хворого на ЦД I типу необхідно ввести третій підпростір – анамнестичний (біометричні та антропометричні характеристики, дані анамнезу, результати психологічного тестування).

Зазначені параметри розподілені на чотири групи: сигнали, які змінюються швидко (динамічні); сигнали, які змінюються повільно (квазі-стаціонарні); експертні оцінки; дані лабораторних досліджень [6]. Також слід враховувати й наявність як зовнішніх, так і внутрішніх чинників, що можуть впливати на глікемічний профіль хворого (емоційний стрес, метеозалежність тощо).

Відмінністю АПК є те, що в ньому закладено функцію контролю метеозалежності, яка визначає кліматичні параметри, що впливають на організм хворого, і фізіологічні, які мають підвищену чутливість до тих чи інших метеозбурювань. До таких чинників належать атмосферний тиск, тем-

пература і вологість повітря, геомагнітні бурі та ін., які за своєю природою відносяться до квазі-статичних.

Вимірювання та перетворення інформації про стан пацієнта здійснюється апаратно-програмним комплексом за інформаційної підтримки, яка за аналогією із [7] представлена сукупністю його функціональних можливостей, що відображаються відповідними функціями.

Функція контролю діабетичного кетоацидозу в ситуації, коли хворий не отримує достатньої кількості інсуліну короткої та ультра-короткої дії протягом багатьох годин.

Функція подачі дуже малих болюсів, що має велике значення для новонароджених.

Функція корекції індивідуальних математичних моделей метаболізму глюкози відповідно до показників, які характеризують стан пацієнта.

Функція залишкового інсуліну, коли розраховується залишок інсуліну в кровотоку, що дає змогу уникнути надлишкової компенсації власного рівня цукру крові непотрібними короткими полюсами

Функція формування болюса, для якої виконується розрахунок дози наступного болюса інсуліну та час його введення ще до того, як буде вичерпано ефект від попереднього болюса. При цьому враховується останній рівень глюкози крові та залишковий інсулін і пропонується адекватна доза інсуліну [7].

Поточний стан хворого на цукровий діабет I типу в загальному вигляді може бути представлений множиною станів  $S_a(t)$ :

$$S_a(t)=[X, \Delta X, Y, \Delta Y, E, \Delta E, O, \Delta O, V, K, (t_1 - t_n)] \times \text{NPN},$$

де  $X$  – значення динамічних параметрів;  $Y$  – значення статичних параметрів;  $\Delta X, \Delta Y$  – діапазони норми статичних і динамічних параметрів;  $E$  – кодовані експертні оцінки;  $\Delta E$  – допустимі діапазони експертних оцінок;  $O$  – кодовані суб'єктивні оцінки (лікаря, пацієнта, консилиуму);  $\Delta O$  – допустимі діапазони суб'єктивних оцінок;  $V$  – дані лабораторних та клінічних досліджень;  $K$  – значення кліматичних параметрів;  $(t_1 - t_n)$  – час контролю та управління; NPN – непрогнозована невизначеність, яку ще можемо визначити як форс-мажорні зміни в поточному стані пацієнта.

Наступним кроком є формування переліку сигналів другого підпростору і приладів, що призначені для їх вимірювання.

Електрокардіограма (ЕКГ) – електрокардіограф трьохканальний мікропроцесорний Medlife. Призначений для реєстрації ЕКГ у трьох стандартних відведеннях і в 6-грудних, триадами за

один цикл виміру. За ЕКГ розраховується: частота серцевих скорочень (ЧСС), варіабельність серцевого ритму (BCP), амплітуди зубців і сегментів P, Q, R, S, T, ST-сегмента і довжин інтервалів PR, RR, PQRST, QRST, STL [8].

Автоматичний електронний тонометр MicroLife – забезпечує вимір в автоматичному режимі артеріального систолічного і діастолічного тиску, ЧСС. У приладі передбачено діагностику серцевих аритмій [9].

Спірометр «СПРО-С-100» – призначений для реєстрації дихальної кривої з подальшим обчисленням частоти дихань (ЧД), життєвої ємності легенів (ЖЄЛ), дихального об'єму (ДО), максимальної вентиляції легенів (МВ Л), форсованого об'єму видиху (ФОВ) [10].

Фотоплетизмограф (власна розробка) – забезпечує реєстрацію фотоплетизмограми (ФПГ) за допомогою комплексу давачів на відбивання і проникнення світла та обчислення таких показників: індекс стресу, загальна стресостійкість, емоційна резистентність організму та ін.

Температура тіла – термометр MicroLife з діапазоном температур 30–45°C; похибка 0,1°C [11].

На рис. 1 представлено структурну схему апаратно-програмного комплексу, яка побудована за багаторівневим принципом і містить у собі рівень реєстрації даних пацієнта, рівень моделювання ситуацій, рівень оброблення даних, рівень підтримки прийняття рішень. Визначені рівні, своєю чергою, включають: блок формування поточного глікемічного профіля (БФПГП), блок моделювання належного глікемічного профіля (БМНГП), блок порівняння та отримання різницевого глікемічного профіля (БПРГП), блок корекції моделі (БКМ), блок визначення дози інсуліну (БВД), блок моделювання харчової функції (БМХФ), блок підтримки прийняття рішень (БППР), блок визначення функціонального стану пацієнта (БВФСП), комплексну базу даних, яка складається з баз даних: інсулінів і реакцій пацієнтів на тестові ін'єкції; фізичного навантаження і медикаментів; супутніх захворювань і значень та діапазонів норми фізіологічних сигналів, харчових раціонів і часу затримки.

БПРГП забезпечує за результатами порівняння поточного і модельного належного глікемічних профілів пацієнта визначення різницевого глікемічного профіля (РГП), рівень якого об'єктивно оцінює ступінь важкості хворого на ЦД I типу в даний момент часу  $t$ . Отриманий індивідуальний різницевий глікемічний профіль виявляє періодичні порушення в компенсації діабету та його

лікуванні і фактично є базисом для розрахунку доз інсуліну.

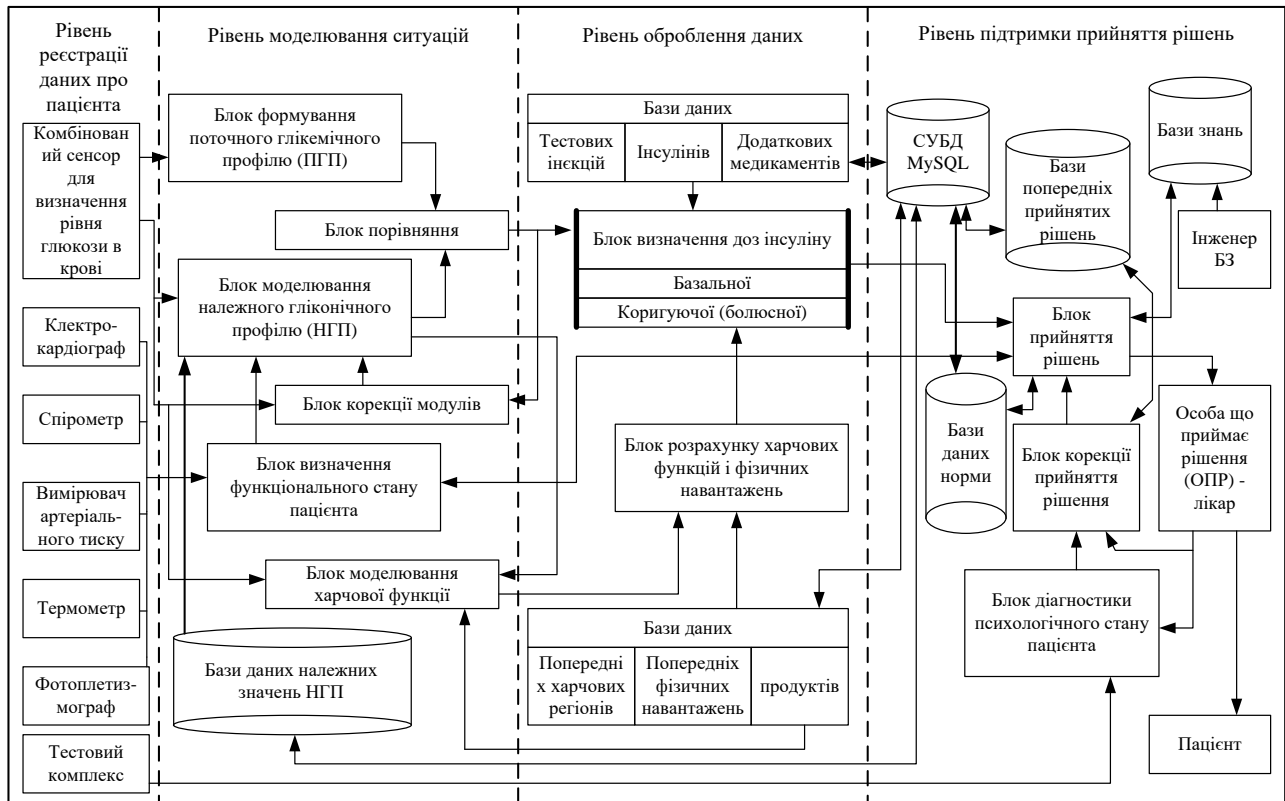
Процес визначення доз інсуліну є вкрай відповідальним і повинен бути практично безпомилковим. Саме тому в процесі його розрахунку також ураховуються дані з відповідних БД: інсулінів, фізичних навантажень, харчової функції, часу затримки, тестових ін'єкцій, медикаментів. Уведення режиму тестових ін'єкцій суттєво сприяє точному визначенню доз інсуліну й режимів його введення.

Вихідним блоком АПК за логікою побудови комплексу є блок підтримки прийняття рішень із керованої гіпоглікемії. Кінцеве рішення про забезпечення відповідного режиму управління глікемічним профілем приймається з урахуванням отриманої розрахункової дози інсуліну; анамнезу пацієнта; інформації з баз даних – медикаментів, супутніх захворювань, специфіки предметної сфери; реакції пацієнта на тестові ін'єкції; значень діапазонів «норми»; результатів психофізіологічного тестування.

АПК для моніторингу та управління глікемічним профілем є базовим апаратно-програмним комплексом для хворих на цукровий діабет I типу, який реалізує просторово-часові процеси оброблення та аналізу даних, оцінювання поточного стану, контроль виявлення динаміки його зміни у хворих на ЦД I типу і підтримку прийняття рішень і побудований на основі математичної моделі процесу моніторингу та управління глікемічним профілем, яка враховує співвідношення між енергією, що отримується й споживається.

Блоковий підхід до розроблення структурної схеми АПК є максимально ефективним на етапі створення експериментального і дослідного зразків, оскільки дає змогу зробити блок давачів і сенсорів у вигляді комбінованої структури, поєднавши в собі стандартні прилади (електрокардіограф, спірометр, вимірювачі температури та артеріального тиску) і прилади власної розробки (фотоплетизмограф).

БФПГП формує поточний глікемічний профіль хворого за результатами моніторингу рівня глюкози, що реєструє сенсор глюкози, й які поступають на його вхід із блоку сенсорів. Ці ж значення поступають на блок моделювання належного глікемічного профіля хворого (БМНГП), в якому для отримання належного профіля враховуються інші основні компоненти процесу: значення фізіологічних сигналів – із виходу блоку БВФСП; значення поточного рівня глюкози – з виходу сенсору глюкози; значення сигналу корекції – з блоку корекції



**Рис. 1. Структурна схема апаратно-програмного комплексу для моніторингу та управління глікемічним профілем**

моделі; час затримки поточний, розрахункові значення харчової функції.

Для забезпечення високої якості і точності визначення рівня глюкози розроблено комбінований сенсор, який поєднує у своїй функціональній структурі два вимірювальних канали, що працюють за різними принципами: перший, в якому визначення рівня глюкози здійснюється за фотоплетизмографією, що реєструється з пальця, і другий, в якому використовується параметри повітря, що видихає пацієнт і яке реєструється за допомогою спеціального комбінованого сенсора [12]. Ще одним елементом новизни сенсора фотоплетизмограми є визначення рівня стресу та деяких інших характеристик стресового стану, що так необхідне, особливо для хворих із тяжкою формою цукрового діабету [13].

Структурна схема комбінованого сенсора показана на рис. 2. Серед схематичних особливостей слід відзначити застосування підсилювально-оптичних систем, які більш точно фокусують випромінювання світлодіодів, збільшуючи тим самим ту частину випромінювання, яка проходить через шкірний покрив. Функціональне призначення сенсорів, що входять до складу комбінованого сенсора повітря, що видихається, розгля-

нуто під час розроблення метода визначення рівня глюкози [12], а схематичне рішення фотоплетизмографічних сенсорів виконано за класичною схемою з більш детальним підбором світлодіодів і фотодіодів (приймачів). Конструктивно фотоплетизмографічні сенсори виконані у вигляді кліпси на палець, а комбінований сенсор детально описаний у [12].

Слід відзначити, що доцільність використання світлодіодного випромінювання з різними спектральними характеристиками зумовлює необхідність забезпечити, з одного боку, максимальну глибину проникнення випромінювання в шкіру, а з іншого – роботу сенсора в так званому «вікні прозорості» (600... 1200 нм) [14]. Саме такий підхід забезпечує реалізацію додаткових його функцій, таких як: а) можливість варіації прозорістю в широкому діапазоні; б) застосування змінних оптичних сенсорів із різними діаграмами направленості; в) застосування різних режимів випромінювання – від неперервного до імпульсного з регулюванням параметрів; г) використання джерел випромінювання з різними довжинами хвиль. Блок підтримки прийняття рішення разом із комбінованим сенсором глюкози несе солідарну відповідальність за кінцевий результат процесу діагностики

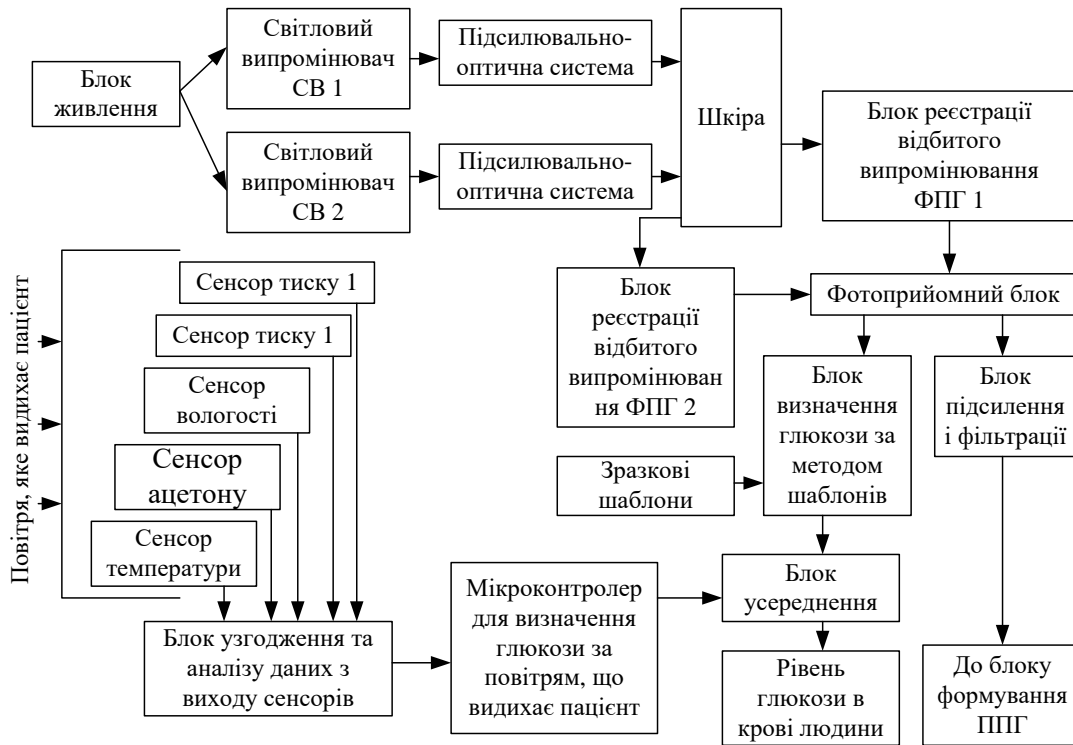


Рис. 2. Структурна схема комбінованого сенсора для вимірювання рівня глюкози в крові

і лікування, саме тому для забезпечення надійної і своєчасної роботи до його складу входять блок корекції прийняття рішень, база даних попередньо прийнятих рішень та інші, які наведено на розширеній структурній схемі БППР (рис. 3).

Для зменшення невизначеності предметної сфери масив діагностичних і прогностичних ознак та критеріїв сформовано шляхом накопичення емпіричних і суб'єктивних знань, спостережень за діями лікаря та експертів. Проміжне сховище даних рекомендується будувати на основі СУБД MySQL або з використанням OLAP-кубів. Механізм прийняття рішень найчастіше представлено нейронними мережами, нечіткою логікою, генетичними алгоритмами, методами математичної статистики і теорії ймовірностей, методами прогнозування, регресійним і кластерним аналізом.

Інформаційна структура БППР представлена сукупністю спеціалізованих локальних баз даних норми психофізіологічних показників; БД попередньо прийнятих рішень і належних значень глікемічного профіля; БД тестових ін'єкцій інсуліну, типів і параметрів інсуліну, додаткових медикаментів; БД попередніх харчових раціонів, попередніх фізичних навантажень і продуктів. Остання БД дає змогу отримати повну інформацію про якісно-кількісний склад їжі.

Отримана інформація по кожному пацієнту в сукупності з параметрами інсулінотерапії дає

змогу лікарю формувати, а пацієнту – підтримувати узгоджений режим життєдіяльності й мінімізувати можливий дисбаланс між калорійністю і складом їжі, енерговитратами організму хворого та вибором параметрів інсулінотерапії.

Блок підтримки прийняття рішень забезпечує розпізнавання ситуації, що потребує прийняття рішення і виробляє набір можливих альтернатив рішення і критеріїв для їх оцінювання. Блок оцінювання адекватності рішень, використовуючи автономну базу даних критеріїв оцінювання, проводить оцінювання ефективності, адекватності і безпомилковості прийняття рішення. У разі позитивного результату рішення піддається процедурі виконання та документування і доводиться до особи, що приймає рішення. Якщо результат оцінювання негативний, то блок корекції, використовуючи суть і зміст рішення, проводить корегування алгоритму досліджуваного процесу, після чого процедура вибору оптимального рішення повторюється.

Система управління базами даних (СУБД) призначена для залучення спеціалізованих програмних та лінгвістичних засобів до процесу створення та управління базою даних, володіє оптимальними для вирішення завдання функціями та відповідає низці критеріїв [15].

Вибір СУБД проводився з урахуванням майбутнього розвитку структури, масштабованості

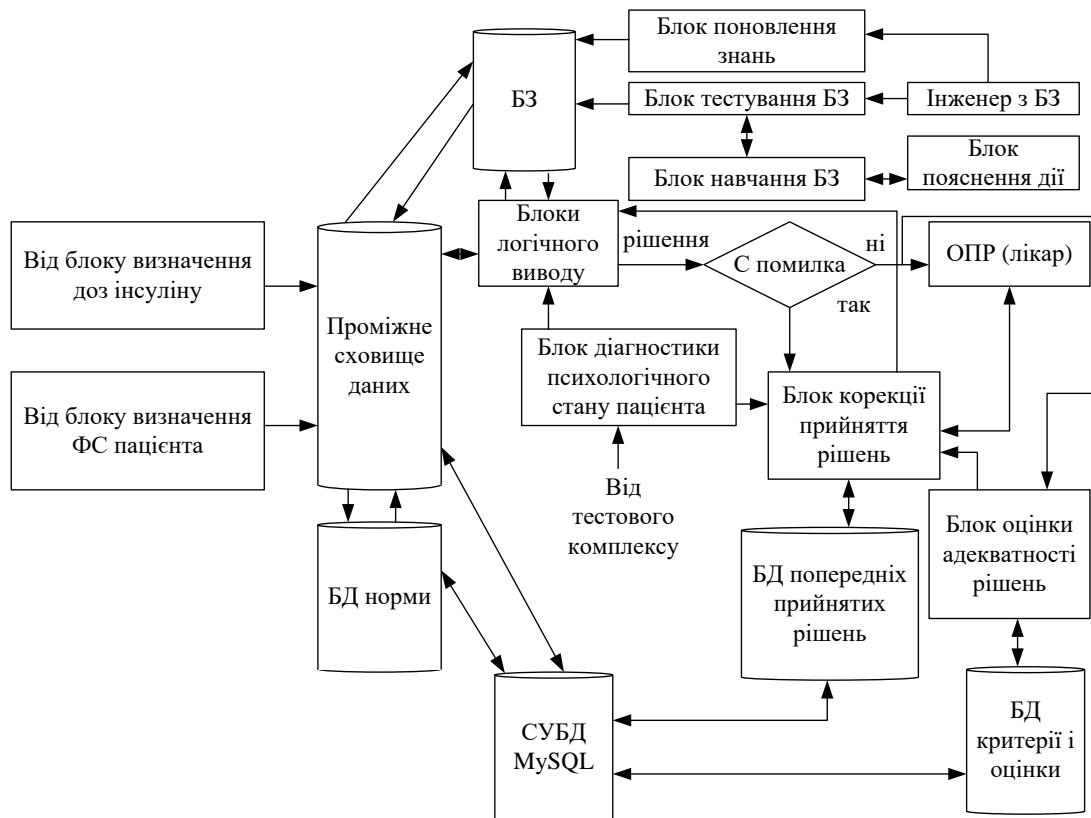


Рис. 3. Розширена структурна схема БППР

СУБД, продуктивності, надійності та зручності у використанні.

Сучасні СУБД MySQL, PostgreSQL та Firebird SQL можуть працювати на декількох платформах, включаючи найпопулярніші Windows, Linux, OSX і BSD. Вони підтримують як реляційну, так і об'єктно-реляційну базу даних, а швидкість обробки транзакцій не спонукає використовувати дорогі потужні сервери і платформи [16].

**Висновки.** Апаратно-програмний комплекс для моніторингу та управління глікемічним профілем на відміну від традиційної інсулінотерапії і «штучної бета-клітини», яка за своєю суттю є чисто технічним регулятором, являє собою інтелектуальну біотехнічну систему, що відповідає принципу ситуативності, забезпечує безперервний моніторинг глікемічного профілю, формує оптимальні керуючі впливи за принципом біологічного зворотного зв'язку, який урахує кількісні закономірності фізіологічних процесів, здійснює дифузю інсуліна, що неперервно контролюється, у режимі малих доз; прогнозування динаміки глікемічного профіля.

Комплекс призначено для ліквідації гострих станів, передусім у хворих на ЦД I типу зі ста-

більним перебігом хвороби, які знаходяться на лікуванні в умовах стаціонару. При цьому компенсація вуглеводного обміну у таких хворих підтримується тільки на тлі прийому цукрознижуючих лікарських препаратів. Для хворих із цукровим діабетом дуже складно спрогнозувати, яким буде рівень цукру наступного разу, – низьким чи великим. Це призводить до того, що лікарю важко взяти таку ситуацію під контроль, але ще складніше її нормалізувати. Найчастіше такі випадки закінчуються госпіталізацією, коли тільки в умовах стаціонару лікар може підібрати той тип невідкладної допомоги, за якого рівень цукру в крові буде нормалізовано якнайшвидше.

Така ситуація призводить до того, що у хворих на цукровий діабет досить часто діагностують синдром постглікемічної гіперглікемії, який зумовлений введенням неадекватно високих доз інсуліну (передозування інсуліном) і знаходиться у тісному зв'язку з рівнем стресу у таких хворих. Це пояснюється тим, що у відповідь на введення хворому великих доз інсуліну (на всяк випадок) концентрація глюкози в крові різко зменшується, і, як наслідок, розвивається гіпоглікемія – важка стресова ситуація, яка загрожує життю пацієнта.

**Список літератури:**

1. Пустозеров Е.А. Мобильная система информационной поддержки больных гестационным сахарным диабетом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.17 «Приборы, системы и изделия мед. назначения» ; СПб. гос. электротех. ун-т «ЛЭТИ». Санкт-Петербург, 2017. 18 с.
2. Нефедов О.Ю. Система управления здоровьем человека: функциональные требования и архитектура. *Программные продукты и системы. Software systems*. 2015. № 1(109). С. 100–106.
3. Pustozеров Е.А., Yuldashev Z.M. A Remote Monitoring System for Diabetes Patients. *Biomedical Engineering*. July 2014. Vol. 48. Issue 2. P. 74–77.
4. Новосельцев В.Н. Теория управления биосистемами. Москва : Наука, 1998. 89 с.
5. Oral glucose tolerance test minimal model indexes of beta cell function and insulin sensitivity / E. Breda et al. *Diabetes*. 2001. Vol. 50(1). P. 150–158. DOI: 10.2337/diabetes.50.1.150.
6. Старков Е.Ф. Проектирование модулей измерения параметров объектов в биомедицинских системах. *Вестник новых медицинских технологий*. 2003. № 3. С. 89–92.
7. Редькин Ю.А. Основные принципы помповой инсулинотерапии при сахарном диабете. *Российский медицинский журнал*. 2015. № 8. С. 446–452.
8. Электрокардиограф 3-х канальный микропроцессорный. Проспект фирмы «Medlife». Украина, 2008.
9. Тонометр автоматический электронный. Проспект фирмы «Microlife». Швейцария, 2002.
10. Спирометр «Спиро-С-100». Проспект фирмы «Medlife». Украина, 2005.
11. Термометр электронный. Проспект фирмы «Microlife». Швейцария, 2002.
12. Сурова Н.М. Система прогнозирования развития передиабетического stanu людини : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.17 ; ВНТУ. Вінниця, 2014. 21 с.
13. Сергеева В.В. Біомедична система для оцінювання параметрів емоційного стресу : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.17 ; ВНТУ. Вінниця, 2012. 21 с.
14. Чайковский И., Ахманов М. Неинвазивный глюкометр: реальность и надежды. URL: <http://www.moidiabet.ru/articles/neinvazivnii-gljukometr-realnost-i-nadejdi-ichaikovskii-mahmanov>.
15. Системы управления базами данных. URL: <http://www.lecturesdb.readthedocs.io/databases/dbms.html>.
16. Состав и функции систем управления базами данных. URL: <http://www.csaa.ru/sostav-i-funkcii-system-upravleniya-bazami-dannyh/>.

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ГЛИКЕМИЧЕСКИМ ПРОФИЛЕМ БОЛЬНЫХ САХАРНЫМ ДИАБЕТОМ**

*Целью статьи является разработка аппаратно-программного комплекса для мониторинга и управления гликемическим профилем больного, а также его структурной схемы. В отличие от традиционной инсулинотерапии и «искусственной бета-клетки» аппаратно-программный комплекс представляет собой интеллектуальную биотехническую систему, отвечающую принципу ситуативности, обеспечивает непрерывный мониторинг гликемического профиля, формирует оптимальные управляющие воздействия по принципу биологической обратной связи.*

**Ключевые слова:** гликемический профиль, сахарный диабет, постгликемическая гипергликемия, глюкоза.

**APPARATUS-SOFTWARE COMPLEX FOR MONITORING AND CONTROL OF GLUCIQUE PROFILE OF DIABETES MELLITUS**

*The purpose of the article is to develop a hardware and software complex for monitoring and managing the patient's glycemic profile, as well as its structural scheme. Unlike traditional insulin therapy and "artificial beta cells," the hardware and software complex is an intellectual biotechnical system that meets the principle of situationality, provides continuous monitoring of the glycemic profile, forms the optimal control effects on the principle of biological feedback.*

**Key words:** glycemic profile, diabetes mellitus, fasting glycemic hyperglycemia, glucose.

УДК 004.93'1

**Коваль Л.Г.**

Вінницький національний технічний університет

**Зленко С.М.**

Вінницький національний технічний університет

**Новіцький Г.М.**

Вінницький національний технічний університет

**Крекоtenь Є.Г.**

Вінницький національний технічний університет

## МЕТОДИ І ТЕХНОЛОГІЇ БІОМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

*У статті проведено аналіз методів біометричної ідентифікації та технологій їх реалізації. Підтверджено актуальність наявної проблеми ідентифікації і аутентифікації особистості і визначено її як одну з пріоритетних. Наведено переваги, недоліки та основні характеристики біометричних ідентифікаційних технологій методів біометричної ідентифікації, що дозволило класифікувати їх.*

**Ключові слова:** ДНК, відбиток пальця, райдужна оболонка, біометрична ідентифікація.

**Вступ.** Біометрична ідентифікація – це спосіб ідентифікації особистості за окремими специфічними біометричними ознаками (ідентифікаторами), які властиві конкретній людині.

Біометричні технології базуються на біометрії, вимірюванні унікальних характеристик окремо взятої людини. До них належать унікальні ознаки, отримані нею з народження (ДНК, відбитки пальців, райдужна оболонка ока) або характеристики, придбані згодом або ж здатні змінюватися з віком або в результаті зовнішнього впливу (почерк, голос або хода) [1].

Біометричні технології застосовуються в багатьох областях, пов'язаних із забезпеченням безпеки доступу до інформації й матеріальних об'єктів, а також у завданнях унікальної ідентифікації особистості. Застосування біометричних технологій різноманітні: доступ до робочих місць і мережних ресурсів, захист інформації, забезпечення доступу до певних ресурсів і безпека. Ведення електронного бізнесу й електронних урядових справ можливе тільки після дотримання певних процедур з ідентифікації особистості. Біометричні технології використовуються в області безпеки банківських обігів, інвестування тощо, а також роздрібній торгівлі, охороні правопорядку, питаннях охорони здоров'я, а також у сфері соціальних послуг.

За останні два десятиліття біометричні технології зробили великий крок уперед. Багато в чому

цьому сприяло поширення мікропроцесорних технологій. Використання в системах контролю й управління доступом (СКУД) біометричних сканерів практично не ускладнює систему безпеки, і їх вартість для деяких біометричних методів дуже низька. Навіть більше, близько третини ноутбуків та смартфонів випускаються зараз із вбудованою системою зчитування відбитка пальців, а за наявності в ноутбучі відеокамери на ньому можна встановити систему розпізнавання людини за геометрією обличчя.

**Сучасний стан.** Інформація, яка міститься в кількох біометричних параметрах, може бути інтегрована за допомогою різних методів на різних рівнях і в різному контексті. Прийнято поєднувати в один клас мультимодальні та багатофакторні рішення. У мультимодальних системах ідентифікатори одного типу (наприклад, відбитки пальців) обробляються за допомогою різноманітних алгоритмів з метою підвищення надійності ідентифікації. У багатофакторних системах разом з біометричними використовуються також і інші ідентифікатори (Рip-код, пароль, смарт-карта тощо). Основною метою багатофакторних систем є прискорення процесу ідентифікації та/або надання можливості розпізнавання без звертання до централізованої бази даних ідентифікаторів. Першими роботами з мультибіометричної ідентифікації вважають експерименти 1976–1978 рр. із застосування логічних класифікаторів для іденти-



фікації за кількома біометричними характеристиками [21].

Існує безліч різних джерел інформації, які можуть бути використані для розширення можливостей біометричної системи. Сьогодні виділяють такі методи інтеграції:

- різні біометричні характеристики (зображення обличчя і відбиток пальця);
- множинні біометричні характеристики (відбитки різних пальців, райдужна оболонка лівого і правого ока);
- різні способи отримання біометричних зразків (зображення обличчя у видимому та інфрачервоному діапазоні);
- різні сканери (дві фотокамери);
- кілька зразків однієї біометричної характеристики;
- кілька алгоритмів порівняння біометричних зразків [22].

Незалежно від методу має місце сильна або слабка двостороння інтеграція інформації з різних джерел. У першому випадку вихідні сигнали від різних біометричних сенсорів можуть бути використані для створення сукупності більш точних та інформативних вхідних сигналів. У другому – зв'язок між вхідними сигналами (наприклад, обличчя і відбитку пальця) буде досить слабким або взагалі відсутнім. У цьому випадку інтеграція відбувається на рівні автономних сенсорів, і кожен пристрій незалежно від інших оцінює біометричний зразок. Властивості і шаблони, які виділені однією біометричною системою, неприйнятні для іншої, тоді як значення персональних біометричних параметрів піддаються інтеграції. У системах ідентифікації особистості інтеграція кількох біометричних характеристик відбувається або на рівні ухвалення рішення або на рівні обчислень [21].

Кількість помилок у системах біометричної ідентифікації визначається точністю, з якою внутрішній біометричний пристрій зіставлення зможе визначити, яка з гіпотез є дійсною. Вводячи біометричні зразки, можна будувати дві гіпотези: нульову та альтернативну.

Завдання визначення оптимального методу подібності можна звести до завдання оцінювання щільностей біометричних порівнянь. Але на етапі навчання мультибіометричної системи (визначення розподілів біометричних порівнянь) доступна лише досить обмежена інформація, яка використовується для оцінювання статистичних властивостей біометричних систем.

Це призводить до того, що по-перше, при використанні емпіричних частот як оцінок дійсних

функцій розподілу спостерігають сильну залежність від навчальної вибірки й значну дисперсію результатів навчання.

По-друге, навіть при прийнятті певних припущень про динаміку помилок розпізнавання дисперсія прогнозу зі зменшенням рівня Коефіцієнту Невірного Допуску (КНД) росте неприйнятними темпами, що пояснюється нездатністю емпіричних щільностей до узагальнення на генеральну сукупність.

По-третє, слід враховувати, що інтеграцію технології застосовують для побудови систем ідентифікації з дуже низьким КНД, тому проблемою є верифікація результатів [22].

Для статистично залежних біометричних характеристик можна використовувати методи оцінювання щільностей розподілів, які оперують із багатомірним простором результатів порівнянь та залежно від рівня інтеграції біометричних технологій.

Найпоширенішим випадком інтеграції залежних технологій є використання кількох алгоритмів порівнянь із метою поліпшення якості розпізнавання й підвищення надійності системи ідентифікації. Отриманий комбінований алгоритм можна розглядати як нову одноmodalну біометричну технологію, що усуває проблеми з верифікацією результатів завдяки тому, що навчання і випробування можна провести на доступних масивах за окремими біометричними характеристикам [11; 21].

**Постановка проблеми.** Недостатній рівень достовірності результатів ідентифікації зумовлений неадекватним вибором методу або комбінації методів, помилками під час формування апаратних засобів і низькою інформативністю обраних критеріїв і характеристик.

За принципом дії біометричні методи ідентифікації поділяються на статичні (за ознаками, даними людині з народження), динамічні (за ознаками, що набуті в процесі існування) та комбіновані (поєднання двох перших) [6].

Фізіологічні (статичні) методи біометричної ідентифікації:

- сканування райдужної оболонки ока;
- сканування сітківки ока;
- сканування рисунку вен долоні;
- геометрія кисті руки (відбитки пальців – дактилоскопія, розмір, довжина і ширина долонь);
- розпізнавання рис обличчя (контур, форма; розташування очей і носа);
- структура ДНК-сигнатури.

Поведінкові (динамічні) методи;

- аналіз підпису (форма букв, манера письма, натиск);

- аналіз тембру голосу;
- аналіз клавіатурного почерку тощо [4; 7].

За технологією реалізації, методи ідентифікації особистості бувають: оптоелектронні, напівпровідникові, ультразвукові, піроелектричні, електрооптичні, комбіновані, телевізійні та тепло-візійні.

Найпоширенішими методами біометричної ідентифікації особистості є сканування райдужної оболонки і відбитків пальців, які разом становлять 2/3 від усього обсягу систем ідентифікації.

Більшість людей вважають, що в пам'яті комп'ютера зберігається зразок відбитка пальця, голосу людини або картинка райдужної оболонки його ока. Але в реальності в більшості сучасних систем це не так. У спеціальній базі даних зберігається цифровий код довжиною до 1 000 біт, який асоціюється з конкретною людиною, що має право доступу. Сканер або будь-який інший пристрій, який використовується в системі, зчитує певний біологічний параметр людини, потім обробляє отримане зображення або звук, перетворюючи їх на цифровий код. Саме цей ключ і порівнюється із вмістом спеціальної бази даних для ідентифікації особистості [5].

**Біометрична ідентифікація за відбитками пальців.** Дактилоскопія – найбільш розроблений на цей час біометричний метод ідентифікації особистості. Швидкому розвитку методу слугувало його широке використання в криміналістиці ХХ століття. Розпізнавання відбитка пальця базується на аналізі розподілу особливих точок (кінцевих точок і точок розгалуження папілярних ліній), розташування яких задається в декартовій системі координат [8].

Кожна людина має унікальний папілярний візерунок відбитків пальців, завдяки чому й можлива ідентифікація. Зазвичай алгоритми використовують характерні точки на відбитках пальців: закінчення лінії візерунка, розгалуження лінії, одиночні точки. Також залучається інформація про морфологічну структуру відбитка пальця: відносне положення замкнених ліній папілярного візерунка, аркових і спіральних ліній. Особливості папілярного візерунка перетворюються на унікальний код, який зберігає інформативність зображення відбитка в базі даних.

Існує два основних алгоритми порівняння отриманого коду з шаблоном із бази даних: за характерними точками і за рельєфом усієї поверхні пальця. У першому випадку виявляються характерні ділянки і запам'ятовується їхнє взаємне розташування. У другому – запам'ятовується вся «картина» в цілому. У сучасних системах використовується також комбінація обох алгоритмів, що підвищує рівень надійності системи.

Під час оцінювання надійності процедури ідентифікації за відбитками пальців постає питання про можливість їхнього копіювання й використання іншими особами для отримання несанкціонованого доступу. Одним із варіантів введення в оману терміналу фахівці називають виготовлення штучної кисті з нанесеними на неї відбитками пальців (або вилучення «оригіналу» в законного власника). Адекватним способом боротьби з такою фальсифікацією є використання інфрачервоного детектора, який дозволяє фіксувати теплове випромінювання від руки або пальця [8; 9].

Іншим способом підроблення є безпосереднє нанесення папілярного візерунка пальців закон-

Таблиця 1

**Надійність та сфера застосування методів ідентифікації [11]**

Метод	Носій біометричної інформації	Імовірність помилки	Надійність	Сфера застосування
Розпізнавання райдужної оболонки ока	Візерунок райдужки	1/1200000	Висока	Критичні до кількості помилок сервіси
Розпізнавання малюнка вен кисті руки	Візерунок вен	1/1100000	Висока	Критичні до кількості помилок сервіси
Дактилоскопія	Відбитки пальців	1/1000	Середня	Універсальна
Форма руки	Розмір, довжина й ширина долонь	1/700	Низька	Некритичні до кількості помилок сервіси
Розпізнавання обличчя	Контур, форма; розташування очей і носа	1/100	Низька	Некритичні до кількості помилок сервіси
Підпис	Форма букв, манера листа, натиск	1/100	Низька	Некритичні до кількості помилок сервіси
Розпізнавання голосу	Характеристики голосу	1/30	Низька	Телефонні сервери

ного користувача на руки зловмисника за допомогою спеціальних плівок. Однак у цьому випадку необхідно отримати якісні відбитки пальців законного користувача, причому саме тих пальців, які були зареєстровані системою [10].

Переваги методу:

1) висока достовірність (статистичні показники методу вищі за показники способів ідентифікації за обличчям, голосом, підписом);

2) низька вартість пристроїв, які сканують зображення відбитка пальця;

3) доволі проста процедура сканування відбитка.

Недоліки методу:

1) папілярний візерунок відбитка пальця дуже легко пошкоджується дрібними подряпинами, порізами;

2) недостатня захищеність від підроблення зображення відбитка [10; 11].

**Біометрична ідентифікація за райдужною оболонкою і сітківкою ока.** У 1994 р. Дж. Даугман у США запатентував метод розпізнавання особи за райдужною оболонкою ока, який використовує і дотепер.

Райдужна оболонка ока є унікальною характеристикою людини. Малюнок райдужки формується на восьмому місяці внутрішньоутробного розвитку, остаточно стабілізується у віці близько двох років і практично не змінюється протягом життя, окрім як в результаті сильних травм або складних патологій. Метод є одним з найточніших серед біометричних технологій [7; 11].

Система ідентифікації особистості за райдужною оболонкою логічно ділиться на дві частини: пристрій захоплення зображення, його первинного оброблення й передачі на обчислювач; обчислювач, який здійснює порівняння зображення із зображеннями в базі даних і передає команду про допуск виконавчому пристрою.

Розрізняють активні й пасивні системи розпізнавання. У системах першого типу користувач повинен сам налаштувати камеру, пересуваючи її для більш точного наведення. Пасивні системи є простішими у використанні, оскільки камера в них настроюється автоматично.

Варто зазначити, що райдужки правого і лівого ока за малюнком суттєво відрізняються.

Переваги методу:

1) статистична надійність;

2) захоплення зображення райдужної оболонки можна здійснювати на відстані від кількох сантиметрів до кількох метрів, при цьому фізичний контакт людини з пристроями не відбувається;

3) райдужна оболонка захищена від пошкоджень рогівкою;

4) стійка протидія підробкам.

Недоліки методу:

1) вартість системи для захоплення райдужної оболонки вища за вартість сканера відбитків пальця і камери для захоплення 2D зображення обличчя [11].

Напрямок біометричної ідентифікації за сітківкою ока розвивається з 1976 р., коли у США була утворена компанія Eyedentify, яка досі зберігає монополію на виробництво комерційних систем ідентифікації за ретиною [11].

До останнього часу вважалося, що найнадійніший метод біометричної ідентифікації – це метод, що базується на скануванні сітківки ока. Він поєднує в собі кращі риси ідентифікації за райдужною оболонкою і за рисунком вен руки. Сканер зчитує малюнок капілярів на поверхні сітківки ока. Сітківка має нерухому структуру, що незмінна в часі, окрім як у результаті очної хвороби, наприклад катаракти.

Сканування сітківки відбувається з використанням інфрачервоного світла низької інтенсивності, спрямованого через зіницю до кровоносних судин на задній стінці ока. Сканери сітківки ока отримали широке поширення в системах контролю доступу на особливо секретні об'єкти, тому що в них один з найнижчих відсотків відмови в доступі зареєстрованих користувачів і практично не буває помилкового дозволу доступу [7].

На жаль, низка труднощів виникає під час використання цього методу біометрії. Під час ідентифікації за сітківкою ока вимірюється кутовий розподіл кровоносних судин на поверхні сітківки щодо сліпої плями ока та інші ознаки. Капілярний малюнок сітківки очей відрізняється навіть у близнюків і може бути з великим успіхом використаний для ідентифікації особистості. Усього нараховують близько 250 ознак. Подібні біометричні термінали забезпечують високу вірогідність ідентифікації на рівні з дактилоскопією, але вимагають від особи, що перевіряється, значний час не рухатися і фіксувати погляд на об'єктиві сканера [7].

Переваги методу:

1) високий рівень статистичної надійності;

2) завдяки невеликому поширенню систем імовірність розроблення засобів їх «обману» досить низька;

3) безконтактний метод реєстрації даних.

Недоліки методу:

1) складна у використанні система і досить довгий час оброблення;

- 2) висока вартість системи;
- 3) відсутність широкого ринку пропозиції і, як наслідок, недостатня інтенсивність розвитку методу [11].

**Біометрична ідентифікація за геометрією обличчя, кисті руки та венозним рисунком долоні.** Існує безліч методів розпізнавання за геометрією обличчя. Всі вони базуються на тому, що риси обличчя і форма черепа кожної людини індивідуальні.

Технічна реалізація методу – більш складна (з математичної точки зору), ніж розпізнавання відбитків пальців, що вимагає дорогої апаратури (необхідна цифрова відео- або фотокамера і плата захоплення відео-зображення). Але метод має один істотний плюс: для зберігання даних одного зразку ідентифікаційного шаблону потрібно небагато пам'яті, оскільки людське обличчя можна «розкласти» на відносно невелику кількість ділянок, незмінних у всіх людей. Наприклад, для обчислення унікального шаблону, відповідного конкретній людині, необхідно всього 12...36 характерних ділянок. Розпізнавання людини за зображенням обличчя відрізняється від інших біометричних систем тим, що, по-перше, не вимагає спец-устаткування, по-друге, відсутній фізичний контакт людини із пристроями. Не треба очікувати дотику або зупинки для спрацьовування системи.

У наш час існують чотири основних методи розпізнавання обличчя, які відрізняються складністю реалізації і метою застосування [13]:

- 1) «Eigenface» або «власне обличчя»;
- 2) аналіз «відмітних рис»;
- 3) «нейронна мережа»;
- 4) автоматичне оброблення зображення обличчя.

Технологія Eigenface використовує двовимірні зображення в градаціях сірого, які представляють характеристики зображення особи, відмінні від інших. Метод Eigenface є основою для інших методів розпізнавання обличчя. Комбінуючи характеристики 100–120 Eigenface, можна відновити велику кількість облич. В момент реєстрації Eigenface кожної конкретної людини представляється у вигляді ряду коефіцієнтів. Для режиму встановлення особистості, у якому зображення використовується для перевірки ідентичності, «живий» шаблон порівнюється із вже зареєстрованим з метою визначення коефіцієнта відмінності. Ступінь відмінності між шаблонами визначає факт ідентифікації. Технологія Eigenface оптимальна при використанні в освітлених при-

міщеннях, коли є можливість сканування особи у фас [13].

Аналіз рис, відмінних від інших, – ще одна із широко використовуваних технологій ідентифікації, яка подібна до технології Eigenface, але в більшому ступені адаптована до зміни зовнішності або міміки людини (усміхнене або насуплене обличчя). В зазначеній технології використовуються десятки характерних рис різних областей обличчя, причому враховується їхнє відносне місце розташування [11]. Індивідуальна комбінація цих параметрів визначає особливості кожного конкретного обличчя людини, яке є унікальним і досить динамічним.

Метод автоматичного оброблення зображення особи – найпростіша технологія, що використовує відстані та їх відношення між точками обличчя, такими як очі, кінець носа, куточки рота. Хоча даний метод і не настільки потужний, як Eigenface або «нейронна мережа», але він досить ефективний в умовах слабкого освітлення [7].

Біометрична ідентифікація за геометрією кисті руки за своєю технологічною структурою і рівнем надійності повністю аналогічна методу ідентифікації особистості за відбитком пальця. Статистична ймовірність існування двох кистей рук з однаковою геометрією надзвичайно мала [7].

Математична модель ідентифікації за даним параметром вимагає небагато інформації – усього 9 байт, що дозволяє зберігати великий обсяг записів і швидко здійснювати пошук. Пристрої ідентифікації особистості за геометрією руки знаходять широке застосування. Так, у США пристрої для зчитування відбитків долонь встановлені більш ніж на 8 000 об'єктах. Пристрій Handkey сканує як внутрішню, так і бічну сторону долоні, використовуючи для цього вбудовану відеокамеру та алгоритми стиску [7].

Ідентифікація користувачів за геометрією руки використовується в законодавчих органах, міжнародних аеропортах, лікарнях, імміграційних службах тощо. Переваги ідентифікації за геометрією долоні адекватні перевагам ідентифікації за відбитком пальця з погляду надійності, хоча пристрій для зчитування відбитків долонь займає більше місця.

Біометрична ідентифікація за малюнком вен руки – нова технологія у сфері біометрії, яка базується на інфрачервоному скануванні вен із подальшим цифровим обробленням. Дана технологія була розроблена для використання в системі охорони здоров'я, щоб допомогти лікарям знайти у пацієнтів вени для ін'єкцій. Але враховуючи те, що струк-

тура вен у кожної людини індивідуальна, ця технологія викликала інтерес фахівців з ідентифікації, як більш надійна відносно технології ідентифікації за відбитком пальця, оскільки відтворити модель кровоносної системи неможливо [7].

Малюнок вен зчитується із зовнішнього боку долоні або кисті руки за допомогою інфрачервоної камери і дозволяє отримати достатньо чітке зображення кровоносних судин, таке, що навіть відносно невеликі порізи чи бруд на поверхні шкіри не перешкоджають успішній реєстрації особи. Поглинаючи випромінювання, відновлений гемоглобін переносить кисень по венах і скорочує ступінь відбиття та відображення малюнка вени у вигляді чорного унікального візерунка. Далі отримане зображення обробляється, і залежно від розташування вен на руці формується цифрова згортка [15].

Переваги методу:

- 1) висока достовірність отриманих результатів;
- 2) відсутність необхідності прямого контакту з пристроєм, що здійснює сканування;
- 3) висока ступінь захищеності – рисунок неможливо отримати від людини «на вулиці», а у випадку використання муляжу кисті малюнок вен не буде зчитаний інфрачервоною камерою;

Недоліки методу:

- 1) недопустиме засвічення сканера сонячними променями і променями галогенних ламп;
- 2) вплив деяких захворювань, наприклад артриту, на прийняття рішення [7; 11]

Біометрична ідентифікація за голосом досить зручна та інформативна, але за умови, що вона здійснюється не людиною, а технічними засобами, до яких належать програмні комплекси, автоматизовані системи, комп'ютеризовані пристрої тощо.

Автомати позбавлені впливу «людського фактору». Вони розрізняють голос і здійснюють ідентифікацію об'єктивно, на основі жорстко детермінованих і заданих наперед ознак. Для підвищення якості ідентифікації за голосом в деяких системах використовують додатково верифікацію голосу, а іноді – аутентифікацію.

Технологія біометричної ідентифікації добре зарекомендувала себе в системах верифікації особистості за голосом в окремих каналах зв'язку, підтвердила більш високу надійність порівняно із частотним набором особистого номера.

В останні роки набуває все більшого розповсюдження біометрична ідентифікація за клавіатурним «почерком» користувача як таким, що за наявності високої стабільності дозволяє іденти-

фікувати з високим рівнем достовірності особу користувача.

При цьому застосовуються статистичні методи обробки вихідних даних і формування вихідного вектора, що є ідентифікатором даного користувача. Як вихідні дані використовують часові інтервали між натисканням клавіш на клавіатурі і часом їх утримання. При цьому інтервали між натисканням клавіш характеризують темп роботи, а час утримання клавіш характеризує стиль роботи із клавіатурою – різкий удар або плавне натискання [7].

Принципова відмінність цих двох способів полягає в тому, що у першому випадку використовується ключова фраза, яка задається користувачем у момент реєстрації його в системі (пароль), а в другому – використовуються ключові фрази, які генеруються системою щоразу в момент ідентифікації користувача [7].

Застосування способу ідентифікації за клавіатурним почерком доцільне тільки стосовно користувачів з досить тривалим досвідом роботи з комп'ютером і почерком роботи на клавіатурі, що сформувався, тобто до програмістів, секретарів тощо. Еталонні характеристики користувача, отримані на етапі навчання системи, дозволяють зробити висновки про ступінь стабільності клавіатурного почерку користувача і визначити довірчий інтервал розкиду параметрів для наступної ідентифікації користувача.

### **Нові методи біометричної ідентифікації.**

Перелік технологій, які можуть бути використані в системах безпеки, постійно розширюється, і більшість з них вважаються досить перспективними:

- 1) аналіз термограми обличчя в інфрачервоному діапазоні випромінювання;
- 2) оцінювання характеристики ДНК;
- 3) аналіз структури шкіри та епітелію на пальцях з використанням цифрової ультразвукової спектроскопії шкіри;
- 4) аналіз форми вухної раковини;
- 5) аналіз характеристик ходи людини;
- 6) аналіз індивідуальних антропометричних особливостей людини;
- 7) розпізнавання за рівнем солоності шкіри [20].

Технологія побудови та аналізу термограм з використанням інфрачервоних камер є одним з останніх досягнень в області біометрії, оскільки дає унікальну картину об'єктів, що знаходяться під шкірою людини. Термограма особи є суворо індивідуальною, завдяки чому можна впевнено

розрізняти навіть близнюків. З інших властивостей цього підходу можна відмітити його інваріантність стосовно будь-яких косметичних змін та прихованість процедури реєстрації.

Технологія, що побудована на аналізі характеристик ДНК (метод геномної ідентифікації), є хоча і найбільш тривалою, але й найбільш перспективною із відомих систем ідентифікації. Метод базується на тому, що в ДНК людини є поліморфні локуси (локус – положення хромосоми в гені або аллелі), які часто мають 8–10 аллелей. Визначення набору цих аллелей для декількох поліморфних локусів в конкретного індивіда дозволяє отримати геномну карту, характерну тільки для цієї людини. Точність даного методу визначається характером і кількістю проаналізованих поліморфних локусів сьогодні дозволяє досягти рівня 1 помилки на 1 млн осіб.

Технологія аналізу відбитків долонь стала розвиватися порівняно недавно, але вже має певні досягнення. Ряд компаній-розробників (наприклад у Великобританії) зосередилися на технології, що аналізує не малюнок ліній на шкірі, а обрис долоні, який також має індивідуальний характер. Аналогічна система, що працює з відбитками пальців, успішно використовується британськими поліцейськими вже 5 років. Але одних лише відбитків пальців, як стверджують криміналісти, часто виявляється недостатньо. До 20% слідів, що залишаються на місці злочину, – це відбитки долонь. Комп'ютеризація цього процесу дозволить використовувати відбитки долонь більш широко й приведе до істотного збільшення розкриття злочинів. Слід відмітити, що пристрої сканування долоні зазвичай мають високу вартість, тому оснастити ними велику кількість робочих місць не так уже й просто [7, с. 20].

Технологія аналізу форми вухної раковини є однією з найбільш останніх розробок у біометричній ідентифікації людини. За допомогою недорогої Web-камери можна отримувати досить надійні зразки для порівняння й ідентифікації. Цей спосіб

поки що недостатньо вивчений, тому у науково-технічній літературі достовірна інформація про поточний стан практично відсутня.

До перспективних слід віднести системи «електронний ніс», що реалізують процес розпізнавання за запахом. Наявність генетичного впливу на запах тіла дозволяє вважати цю характеристику можливого для використання з метою біометричної ідентифікації особистості. Цій технології, як і технології аналізу форми вухної раковини, ще треба буде пройти довгий шлях розвитку, перш ніж вона стане задовольняти біометричним вимогам [11].

**Висновки.** Проведений аналіз літературного контенту, присвяченого методам біометричної ідентифікації та технологіям їх реалізації, підтвердив актуальність існуючої проблеми ідентифікації і аутентифікації особистості і визначив її як одну з пріоритетних, вирішення якої сприяє якісному збереженню персональних даних, забезпечує надійний доступ до об'єктів таємної інформації, наукових розробок тощо. Показано, що поєднання паролів із біометричними характеристиками людини підвищує надійність системи доступу в сотні і тисячі разів.

Наведені переваги, недоліки та основні характеристики біометричних ідентифікаційних технологій методів біометричної ідентифікації дозволили класифікувати їх на статичні (за відбитками пальців, за райдужною оболонкою ока, за геометрією обличчя або кисті руки, за венозним малюнком руки, за сітківкою ока) та динамічні (ідентифікація за голосом, за набором на клавіатурі, за підписом).

Серед нових методів біометричної ідентифікації варто зазначити про такі: за термограмою обличчя, за характеристиками ДНК, за спектроскопією шкіри, за формою вухної раковини, за ходом людини; за індивідуальними антропометричними особливостями людини, за рівнем солоності шкіри. Критичний аналіз цих методів підтвердив їхню життєздатність і перспективи розвитку.

#### Список літератури:

1. Голубев Г.А., Габриелян Б.А. Современное состояние и перспективы развития биометрических технологий. *Нейрокомпьютеры. Разработка. Применение.* № 10. 2004. 40 с.
2. Мороз А.О. Биометрические технологии идентификации человека. Обзор систем. *Математические машины и системы.* 2011. № 1. С. 39–45.
3. Горбань А.Н. Обучение нейронных сетей. Москва : СП ПараГраф, 1990. 156 с.
4. В. Моржаков, А. Мальцев. Современные биометрические методы идентификации. URL: <http://www.polyset.ru>.
5. Иванов А.И. Нейросетевые алгоритмы биометрической идентификации личности. Москва : Радиотехника, 2004. 144 с.

6. Современные биометрические методы идентификации. URL: <http://www.habrahabr.ru/post/126144/>.
7. Царьов Р.Ю., Лемеха Т.М. Біометричні технології: навч. посіб. [для вищих навчальних закладів]. Одеса : ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2016. 140 с.
8. Идентификация по отпечаткам пальцев. Часть 1. / Институт экономической безопасности. Электрон. дан., ред. В. Задорожный. URL: <http://www.bre.ru/security/20994.html>.
9. Maltoni D. Handbook of fingerprint recognition [et al.]. N.Y. : Springer-Verlag, 2009. 494 p.
10. Кухарев Г.А. Биометрические системы: Методы и средства идентификации личности человека. Санкт-Петербург : Политехника, 2004. 204 с.
11. Обзор существующих методов биометрической идентификации. URL: <http://www.sec4all.net/modules/myarticles/article.php?storyid=1265>.
12. Руководство по биометрии / Р.М. Болл Джонатан, Х Коннел., Шарат Панканти и др.; пер. с англ. Н.Е. Агапова. Москва : Техносфера, 2007. 367 с.
13. Belhumeur, P. & Hespanha, J. & Kriegman, D. Eigenfaces vs. Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1997. Vol. 19(7), P. 711–721.
14. Кухарев Г.А., Каменская Е.И., Матвеев Ю.Н., Щеголева Н.Л. Методы обработки и распознавания изображений лиц в задачах биометрии. Москва : Политехника, 2013. 416 с.
15. Тихонов И.А. Информативные параметры биометрической аутентификации пользователей информационных систем по инфракрасному изображению сосудистого русла. *Безопасность информационных технологий*. 2011. № 4. С. 61–68
16. Романец Ю.В., Тимофеев П.А., Шаньгин В.Ф. Защита информации в современных компьютерных системах. 2-е издание. Москва : Радио и связь, 2001. 376 с.
17. Татарченко Н.В., Тимошенко С.В. Биометрическая идентификация в интегрированных системах безопасности. *Специальная техника*. 2002. № 2. 7 с.
18. Рабинер Л.Р., Шафер Р.В. Цифровая обработка речевых сигналов: пер. с англ. / под ред. М.В. Назарова, Ю.Н. Прохорова. Москва : Радио и связь, 1981. 495 с.
19. Широкин В.П., Кулик А.В., Марченко В.В. Динамическая аутентификация на основе анализа клавиатурного почерка URL: [http://www.masters.donntu.edu.ua/2002/fvti/aslamov/files/bio\\_authentication.htm](http://www.masters.donntu.edu.ua/2002/fvti/aslamov/files/bio_authentication.htm).
20. Технологии биометрической идентификации. URL: <http://www.tadviser.ru/index.php>.
21. Синицын И.Н., Новиков С.О., Урмаев О.С. Развитие технологий интеграции биометрической информации. *Системы и средства информатики*. 2004. Вып. 14. С. 4–35.
22. Сесин Е.М., Белов В.М. Построение моделей идентификации личности, основанных на сравнении множества физических или поведенческих характеристик человека. *Вестник Сибгпути*. 2011. № 4(16). 7 с.
23. Ворона В.А., Костенко В.О. Биометрические технологии идентификации в системах контроля и управления доступом. *Comp. nanotechnol.* 2016. Вып. 3. С. 224–241.
24. Введение в криптографию / В.В. Яценко, Н.П. Варнавский, Ю.В. Нестеренко и др.; под редакцией В.В. Яценко. Москва : МЦНМО ЧеРо. 1998. 276 с.
25. Вилле Й. Новые пути биометрии. *Журнал сетевых решений LAN*. 2005. № 1. С. 15–18
26. Безик О.В., Басараб М.А. Разработка и анализ алгоритма биометрической аутентификации по рисунку кровеносных сосудов пользователя. *Молодой ученый*. 2016. № 8. С. 116–119. URL <https://www.moluch.ru/archive/112/28527/>.
27. Тихонов И.А. Модели качества инфракрасных изображений сосудистого русла для целей биометрической аутентификации пользователей информационных систем. *Техническая защита информации*. 2013. № 3.
28. Биометрическая идентификация по рисунку вен ладони (mini How To). 2012. URL: <https://habrahabr.ru/post/149424>.
29. Огнев А.В., Типикин А.П. Центрирование отпечатков при инвариантном распознавании на основе метрики Хаусдорфа. Курск : КурскГТУ : *Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации*, 2008. С. 34–35.
30. Sherlock B., Monro D. A model for interpreting fingerprint topology. *Pattern Recognition*. 1993. Vol. 26, Number 7. P. 1047–1055.

## МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

*В статье проведен анализ методов биометрической идентификации и технологий их реализации. Подтверждена актуальность существующей проблемы идентификации и аутентификации личности, которая определена как одна из приоритетных. Приведены преимущества, недостатки и основные характеристики биометрических идентификационных технологий методов биометрической идентификации, что позволило классифицировать их.*

**Ключевые слова:** ДНК, отпечаток пальца, радужная оболочка, биометрическая идентификация.

**METHODS AND TECHNOLOGIES OF BIOMETRIC IDENTIFICATION  
BY RESULTS OF LITERARY SOURCES**

*The article analyzes the methods of biometric identification and the technologies of their implementation, confirmed the relevance of the existing problem of identification and authentication of the individual and identified it as one of the priority. The advantages, disadvantages and basic characteristics of biometric identification technologies of biometric identification methods, which allowed to classify them, are presented.*

**Key words:** *DNA, fingerprint, iris, biometric identification.*



УДК 621.311.25:621.039:661.654

**Козоровська К.А.**

Одеський національний політехнічний університет

**Газзірєєв Р.А.**

Одеський національний політехнічний університет

**Бєглов К.В.**

Одеський національний політехнічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ АСР КОНЦЕНТРАЦІЇ БОРНОЇ КИСЛОТИ (БК) У ПЕРШОМУ КОНТУРІ АЕС ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА

В енергосистемі України існує невідповідність між виробленням і споживанням електричної енергії протягом добового циклу, а сумарна частка установок, призначених для регулювання навантаження енергосистеми, дуже мала, тому актуальним питанням є адаптація діючих енергоблоків АЕС до нових специфічних умов шляхом створення автоматизованої системи управління енергоблоку потужністю в маневрених режимах. Усі АЕС з ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні, хоча обладнання першого контуру допускає експлуатацію в режимах маневрування потужністю. Раніше були запропоновані нові алгоритми управління потужністю енергоблоку по компромісно-комбінованій програмі регулювання. Одним із елементів зазначеної системи регулювання є самоналагоджувальний регулятор потужності, який впливає на реактор зміною концентрації рідкого поглинача. Таким чином, у статті розглядаються властивості зазначеного регулятора.

**Ключові слова:** АЕС, енергоблок, програма регулювання, потужність.

**Постановка проблеми.** У даний час виникла задача плавного регулювання потужності енергоблоків АЕС. Одним із методів регулювання є зміна концентрації борної кислоти (БК) в теплоносії першого контуру АЕС. Але як об'єкт регулювання концентрація БК має різні статичні і динамічні властивості під час нанесення керуючого впливу з різними знаками.

У численних роботах, присвячених проблемі покриття змінної частини графіків навантажень, зазначається, що підвищення частки АЕС у загальній встановленій потужності вимагає підвищеної маневреності енергообладнання АЕС, тобто роботи енергоблоків АЕС у змінному режимі. Був запропонований новий алгоритм підтримки технологічних параметрів енергоблоку. Для реалізації запропонованого алгоритму в АСУ ТП енергоблоку була розроблена математична модель, за допомогою якої досліджувалися властивості енергоблоку при різних програмах регулювання. Для реалізації зазначеного алгоритму був застосований новий самоналагоджувальний регулятор потужності енергоблоку. Таким чином, стаття присвячена дослідженню властивостей самоналагоджувального регулятора потужності.

**Постановка завдання.** Мета – дослідити синтез автоматизованої системи контролю борної кислоти в теплоносії першого контуру для об'єкта зі змінними статичними і динамічними властивостями, а також дослідити самоналагоджувальний регулятор концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру.

**Виклад основного матеріалу.** В енергоблоці, що працює на електричну мережу, відбувається перетворення теплової енергії, яка виробляється в ядерному реакторі, в механічну енергію вала турбіни, а потім – в електричну енергію в генераторі, як показано на рисунку 1.

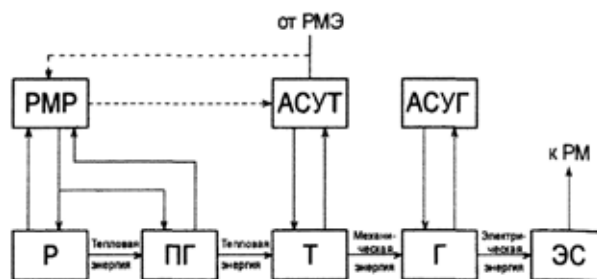


Рис. 1. Схема перетворення енергії та регулювання енергоблоку

Основне завдання регулювання паросилової установки – підтримка рівності між кількістю

виробленої і споживаної енергії. Невідповідність між виробленою енергією в реакторі і споживаною в турбіні проявляється у зміні тиску і температури теплоносія в 1-му контурі і тиску (температури) насиченої пари у 2-му контурі. Зазначена невідповідність має усуватися регулятором потужності реактора (РПР), який надає керуючий вплив або на реактор, або на турбіну в залежності від режиму роботи енергоблоку.

Система автоматизованого управління потужністю енергоблоку (САУП) включає в себе регулятори тиску пари, частоти і потужності реактора і турбіни. Конкретний вид САУП визначається типом реактора, турбогенератора, теплової схеми енергоблоку і режимом роботи в енергосистемі.

Для двоконтурних АЕС важливим є характер зміни параметрів робочих середовищ із контурів (тиск, температура, витрата) під час зміни потужності у статичних режимах роботи (так звана програма регулювання). Вибір статичної програми регулювання залежить від багатьох фізичних, конструктивних, техніко-економічних особливостей енергоблоку і режиму використання його в енергосистемі. Обрана програма регулювання реалізується за допомогою системи управління енергоблоком.

Під час вибору статичних програм регулювання враховують техніко-економічні показники, а також тривалість роботи енергоблоку на знижених рівнях потужності. Найбільше поширення отримали програми з постійним тиском пари у другому контурі ( $P_s = \text{const}$ ), з постійною середньою температурою теплоносія в 1-му контурі ( $t_c = \text{const}$ ) і компромісні програми.

Однак усім перерахованим вище програмам регулювання притаманний загальний недолік: у них не контролюється такий важливий для надійної експлуатації ТВЕЛ параметр, як аксіальний офсет.

Значення АО повинні підтримуватися в певних межах залежно від поточного рівня потужності, як це показано на рисунку 2.

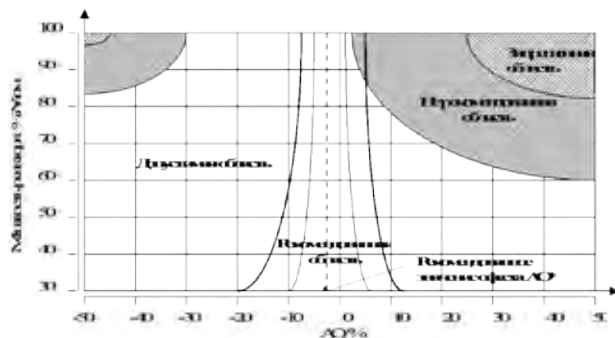


Рис. 2. Залежність аксіального офсету від поточного рівня потужності реактора

Перевищення гранично-допустимих значень коефіцієнтів нерівномірності і АО може призвести до нестійкості нейтронного поля ЯР і виникнення ксенонових коливань висотного розподілу енерговиділення, збільшення часу стабілізації стану реактора в перехідних режимах.

Нерівномірність нейтронного поля реактора знижує економічні показники роботи РУ і в деяких випадках може привести до виникнення передаварійних і аварійних ситуацій. Оскільки під час експлуатації реактора регулюючі стрижні ОР СУЗ знаходяться тільки у верхній частині активної зони, то підтримувати АО можливо тільки переміщаючи ОР СУЗ. З іншого боку, в типових програмах регулювання регулюючі стрижні використовуються для підтримки потужності реактора в цілому.

Потужність енергоблоку є заданою величиною, при цьому вона може бути постійною під час роботи енергоблоку в базовому режимі або змінною під час роботи в регулюючому режимі.

На АЕС із реакторами типу ВВЕР важливим завданням є контроль деяких параметрів теплоносія. Одним із основних контрольованих параметрів є вміст БК ізотопу  $^{10}\text{B}$  в технологічних розчинах енергоблоків. Процес зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру називається борним регулюванням (БР). Борне регулювання згідно з ГОСТ 24693-81 застосовується для:

1) компенсації повільних змін реактивності, пов'язаних із вигоранням ядерного палива, отруєнням  $^{135}\text{Xe}$  і  $^{149}\text{Sm}$ , розігрівом-розхолодженням першого контуру із заданими швидкостями і змінами потужності реактора;

2) забезпечення переходу з будь-якого стану нормальної експлуатації в підкритичний стан і підтримання цього стану при робочій температурі теплоносія;

3) створення і підтримки в першому контурі концентрації борної кислоти, необхідної для безпечного проведення перевантаження реактора і ремонтних робіт;

4) компенсації протікання теплоносія з першого контуру до значень, що не вимагають включення систем аварійного введення бору.

За необхідності проведення БР у колектор ПН подається розчин із бака з концентрованою БК або з бака із чистим конденсатом (знесоленою водою).

Оцінку своїх дій із БР оперативний персонал здійснює, як правило, виходячи зі зміни рівня потужності, аксіального офсету і значення коефіцієнтів нерівномірності енерговиділення.

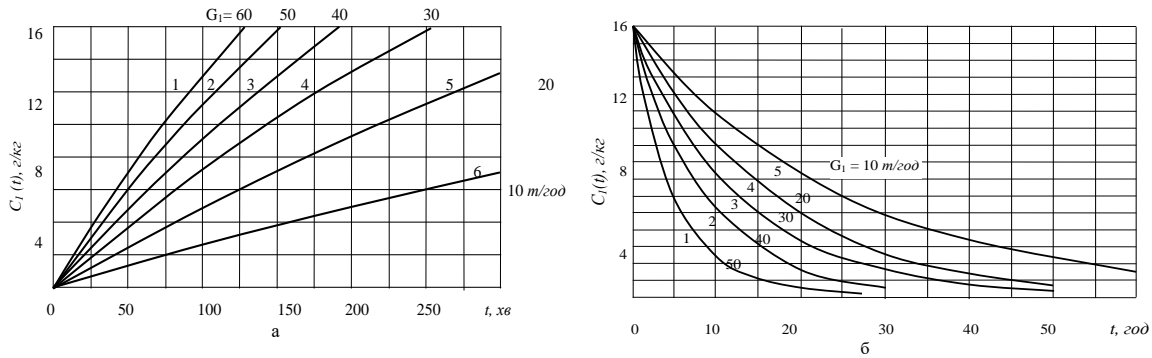


Рис. 3. Зміна концентрації борної кислоти в теплоносії в разі концентрованої підпитки борною кислотою (а) і чистим конденсатом (б)

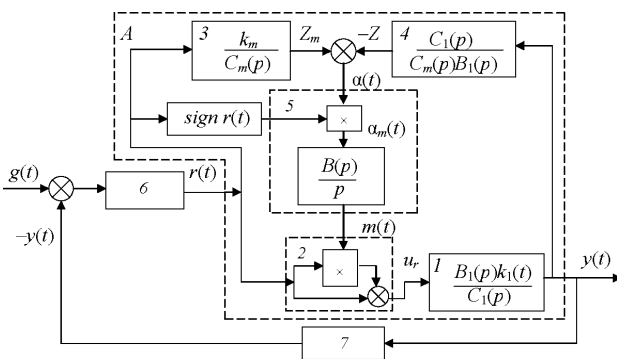


Рис. 4. Структура самоналаджувальних САУ з еталонною моделлю

У роботі розглянуто залежність концентрації в АЗ під час введення БК і чистого конденсату в теплоносій першого контуру. Криві розгону по вказаних каналах приведені на рисунку 3.

Самоналаджувальні системи з еталонною моделлю для автоматичного управління об'єктами зі змінним коефіцієнтом передачі можна будувати за структурою, що складається із самоналаджувальної частини А, звичайного регулятора 6 і датчика зворотного зв'язку 7 (рис. 4) [3–5].

Самоналаджувальна частина А включає об'єкт управління (ОУ) 1 зі змінним коефіцієнтом передачі  $k_1(t)$ , еталонну модель 3 ОУ з бажаним (номінальним) коефіцієнтом передачі  $k_m$ , ланку 4 узгодження виходу ОУ  $y(t)$  з виходом  $Z_m$  еталонної моделі 3, блоку 5 самонастроювання коригуючої ланки 2. Контур самонастроювання охоплює частину основної системи управління, утворюючи додатковий (крім основної системи) негативний зворотній зв'язок через блок 5, здійснюючи синтез управління  $u_r$ , що забезпечує при  $\alpha(t) = 0$  рівність процесів на виходах ОУ 1 і еталонної моделі 3.

Для цього у схемі на рис.4 проведемо еквівалентні заміни операторних функцій передачі ОУ

$$\frac{B_1(p)k_1(t)}{C_1(p)} = \frac{k_1(t)}{C_m(p)} \text{ и звена } 4 \frac{C_1(p)}{C_m(p)B_1(p)} = 1;$$

тоді отримуємо  $y(t) = z(t)$ .

$$\frac{B_1(p)K_1(t)}{C_1(p)} = \frac{K_1(t)}{Tp + 1};$$

$$K_1 = K_{ноч} \dots K_{кон};$$

$$B_1(p) \equiv 1; C_1(p) = Tp + 1; \frac{K_m}{C_m(p)} - \text{еталонна модель } \frac{K_{сп}}{Tp + 1};$$

$B(p)$  – настроюваний параметр, може бути константою.

#### Результати досліджень

Розглянута САУ з еталонною моделлю була реалізована в Matlab для підтримки концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру. Як було зазначено, об'єкт регулювання має змінний коефіцієнт передачі і змінну постійну часу. Однак для дослідження було прийнято, що в синтезованій САУ об'єкт має змінний коефіцієнт передачі і незмінну постійну часу. Схема моделювання показана на рисунку 5.

У процесі роботи були використані настройки регулятора, отримані в [1]. Перехідний процес регулювання в САУ без використання самонастроювання і з використанням самоналаджувального регулятора показано на рисунку 6.

Із даних перехідних процесів можна зробити висновок, що на збільшення борної кислоти, як і на її зменшення, система самоналаджувального регулятора працює добре. А різкий «закид» (на графіку) спостерігається, оскільки відбувається перемикання.

**Висновки.** У процесі регулювання концентрації борної кислоти в першому контурі енергоблоку АЕС об'єкт регулювання має різні властивості під час нанесення керуючого впливу різних знаків. Тому під час синтезу САУ з нелінійним об'єктом регулювання було прийнято рішення

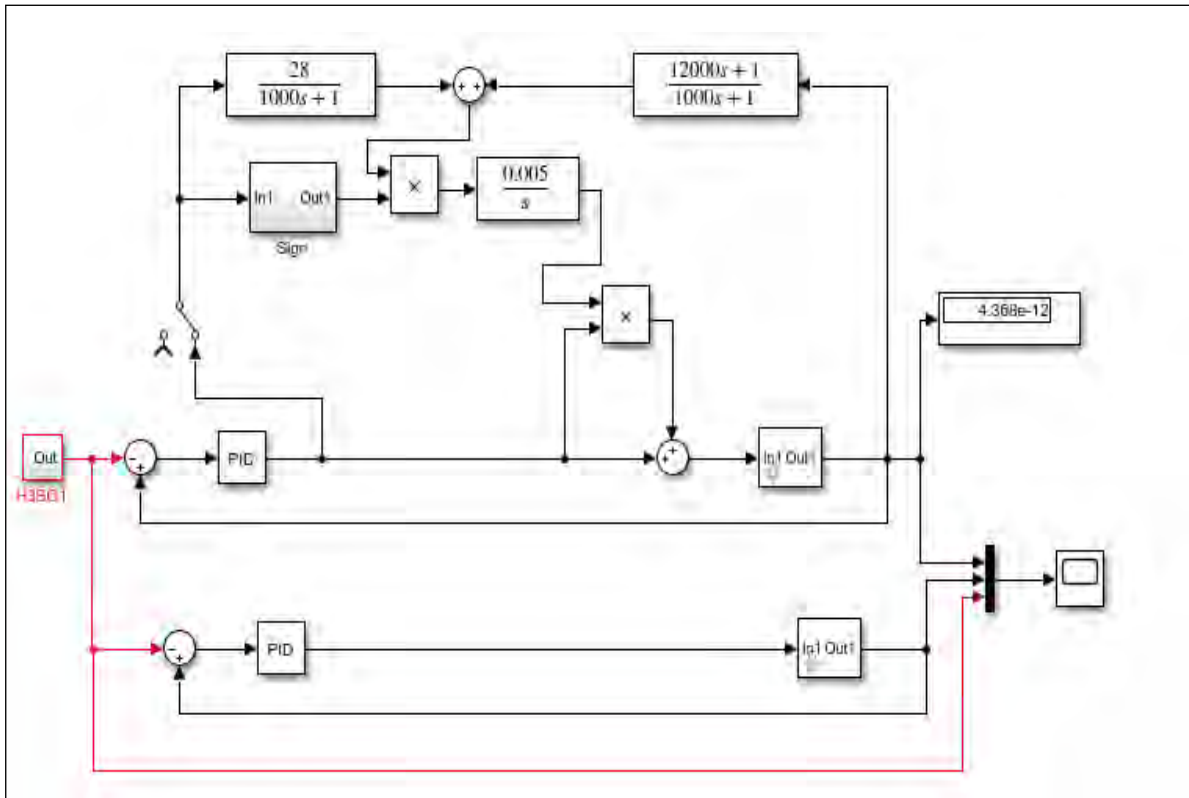


Рис. 5. Схема моделювання САУ концентрації борної кислоти із самоналагоджувальним регулятором

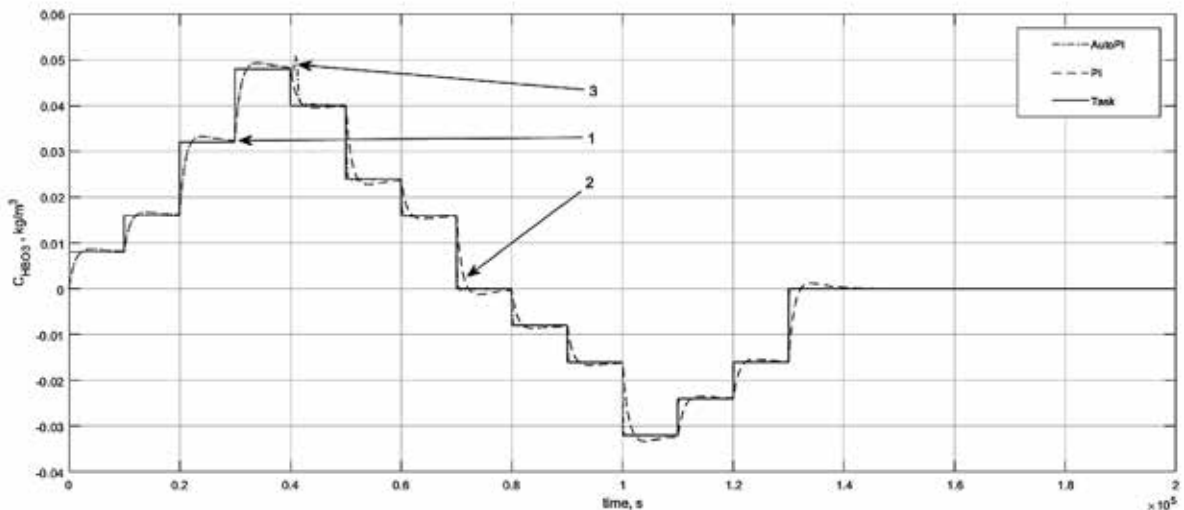


Рис. 6. Перехідний процес регулювання концентрації борної кислоти

1. Зміна завдання.
2. Робота регулятора без самоналаштування.
3. Робота регулятора із самоналаштуванням.

синтезувати самоналагоджувальний регулятор з еталонною моделлю. Порівняння перехідних процесів регулювання показує, що під час включення в роботу блоку самоналаштування і при незмінних властивостях об'єкта перехідні процеси в САУ з автопідстройкою збігаються з

перехідними процесами у вихідній АСР. Під час зміни властивостей об'єкта (спадна частина графіка) виконується самопідстройка регулятора, і регульована величина більш точно відповідає завданню. А саме скорочується час перехідного процесу регулювання.

**Список літератури:**

1. Беглов К.В., Волошкіна О.О., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. Праці Одеського політехнічного університету. 2015. Вип. 2(36). С. 7.
2. Бейнарович В.А. Самонастраивающиеся системы с эталонной моделью.
3. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического. Москва : Наука, 2003. 752 с.
4. Кориков А.М. Основы теории управления. Томск : Изд-во НТЛ, 2002. 393 с.
5. Бейнарович В.А. Инвариантные самонастраивающиеся системы автоматического управления. Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2008. № 1(17). С. 61–64.

**ИССЛЕДОВАНИЕ АСР КОНЦЕНТРАЦИИ БОРНОЙ КИСЛОТЫ (БК) В ПЕРВОМ КОНТУРЕ АЭС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ САМОНАСТРАИВАЮЩЕГОСЯ РЕГУЛЯТОРА**

*В энергосистеме Украины существует несоответствие между выработкой и потреблением электрической энергии в течение суточного цикла, а суммарная доля установок, предназначенных для регулирования нагрузки энергосистемы, очень мала, поэтому актуальной является адаптация действующих энергоблоков АЭС к новым специфическим условиям путем создания автоматизированной системы управления мощностью энергоблока в маневренных режимах. Все украинские АЭС с ВВЭР-1000 эксплуатируются в режиме стабилизации мощности энергоблока на заданном уровне, хотя оборудование первого контура допускает эксплуатацию в режимах маневрирования мощностью. Ранее были предложены новые алгоритмы управления мощностью энергоблока по компромиссно-комбинированной программе регулирования. Одним из элементов указанной системы регулирования является самонастраивающийся регулятор мощности, который воздействует на реактор изменением концентрации жидкого поглотителя. Таким образом, в статье рассматриваются свойства указанного регулятора.*

**Ключевые слова:** АЭС, энергоблок, программа регулирования, мощность.

**STUDY OF ASR CONCENTRATION OF BORIC ACID (BC) IN THE FIRST CIRCUIT OF THE NPP USING A SELF-ADJUSTING REGULATOR**

*In the power system of Ukraine, there is a discrepancy between the production and consumption of electric energy during the daily cycle, and the total share of installations designed to regulate the load of the power system is very small, so it is important to adapt the existing NPP power units to new specific conditions by creating an automated control system for the power unit in maneuvering modes. All Ukrainian nuclear power plants with VVER-1000 are operated in the power unit stabilization mode at a given level, although the primary circuit equipment allows operation in power maneuvering modes. Previously, new algorithms for controlling the power of the power unit by a compromise-combined control program were proposed. One of the elements of this control system is a self-adjusting power control, which affects the reactor by changing the concentration of the liquid absorber. Thus, the article discusses the properties of this regulator.*

**Key words:** NPP, power unit, control program, power.

УДК 004.9:004.67

**Коломоєць Г.П.**

Запорізький національний університет

**Кісельов Є.М.**

Запорізький національний університет

**Таранець А.В.**

Запорізький національний університет

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ОБЛІКУ НАВЧАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ МАЛОЧИСЕЛЬНИХ ГРУП

*У статті розглядається реалізація модулів системи обліку навчального навантаження вищого навчального закладу з урахуванням малочисельних груп студентів засобами Microsoft Excel. Систему впроваджено в Запорізькій державній інженерній академії, ефект від впровадження системи складається з підвищення рентабельності навчальної роботи, забезпечення аудиторними заняттями студентів малочисельних груп, підвищення зацікавленості викладачів та кафедр в наповненні контингенту студентів та його збереженні протягом навчання.*

**Ключові слова:** навчальне навантаження, малочисельні групи, модуль, кількість академічних годин, файл.

**Постановка проблеми.** Одним з напрямів підвищення ефективності функціонування вищого навчального закладу є автоматизація різних аспектів його діяльності. При цьому важливими функціями є планування та облік навчальної роботи структурних підрозділів та викладачів вишу [1]. Оптимізація провадження такої діяльності передбачає адаптацію інформаційних процесів і управлінських рішень відповідно до оточуючого середовища та умов реалізації навчання. Тому створення інформаційних систем з обліку навчального навантаження з урахуванням кількісного складу академічних груп надає змогу оперативно та якісно вирішувати завдання управління навчальним процесом [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сьогодні завдання з автоматизації обліку навчального навантаження вирішується шляхом придбання готових програмних продуктів [3–5] або використання самостійних розробок [6–9]. Проте наявні системи обліку навчального навантаження створювались з розрахунку повнокомплектних академічних груп студентів та потоків. На жаль, демографічна ситуація, спад економіки та інші причини призвели до наявності у більшості вищих навчальних закладів (ВНЗ) малочисельних груп студентів. Традиційне планування навчального навантаження відповідно до вимог наказу Міністерства освіти і науки України (МОНУ) №450 від 07.08.2002 р [10] у цьому випадку є неефективним з точки зору рен-

табельності. Інструктивний лист МОНУ № 1/9-496 від 16.09.2016 «Щодо роботи з малочисельними академічними групами» визнає проблему малочисельних груп та надає деякі рекомендації [11].

**Метою** цієї роботи є розробка системи обліку навчального навантаження з урахуванням малочисельних академічних груп та її впровадження у Запорізькій державній інженерній академії (ЗДІА).

**Постановка завдання.** Основними завданнями під час розробки були:

знаходження функції корегування кількості академічних годин для основних видів навчальної роботи залежно від чисельності академічної групи (підгрупи), освітнього рівня здобувачів вищої освіти, форми навчання та виду навчального навантаження;

забезпечення врахування навчальних доручень з індивідуальним розподілом студентів;

забезпечення синхронізації чисельності академічних груп в системі з даними ЄДЕБО;

забезпечення можливості зміни навчального навантаження впродовж навчального року з перерахунком частки ставки науково-педагогічних працівників;

забезпечення автономного заповнення та корегування навчального навантаження відповідальними працівниками кафедр;

забезпечення генерування карток обсягів навчальної роботи кафедр та індивідуального навчального навантаження викладачів.

**Виклад матеріалу дослідження.** Система обліку навчального навантаження з урахуванням малочисельних груп студентів (СОННУМГ) має архітектуру (рис. 1), що складається з:

- модуля обліку видів занять та навчальних доручень;
- модуля обліку навантаження викладачів;
- модуля обліку контингенту студентів;
- модуля генерування карток навантаження та звітів.

Напрямки стрілок на рис. 1 вказують напрямки основних потоків даних між модулями.

СОННУМГ реалізована як набір файлів формату Microsoft Excel, в яких за допомогою функцій Excel, макросів на мові програмування Visual Basic for Application (VBA) [12] та зведених таблиць реалізована необхідна функціональність. Вибір на користь набору файлів, а не централізованої багатокористувацької системи, зумовлений вимогою автономної роботи відповідальних осіб кафедр з файлами навантаження.

Призначення модулю обліку видів занять та навчальних доручень – виконувати основну роботу по розрахунку годин навантаження викладачів. Атрибути кожного запису (назви стовпців електронної таблиці) можна поділити на атрибути робочого навчального плану (рис. 2а), атрибути розрахунку видів навчального навантаження (рис. 2б) та атрибути, що реалізують допоміжну функціональність (рис. 2в).

Розрахункова частина модуля містить формули, які вводять залежність аудиторного навантаження від чисельності групи студентів. Для прикладу розберемо формулу для обчислення аудиторних годин практичних занять/семінарів:

**=ЕСЛИ(ЕПУСТО(\$J8);ЕСЛИ(\$BВ8<\$Т8;\$ВВ8;\$Т8);\$Т8).**

Перша умова перевіряє, чи викладається дисципліна у потоці груп студентів, якщо так, то у стовпці **\$J** вказується ідентифікатор потоку і функція ЕПУСТО поверне ЛОЖЬ. В цьому випадку

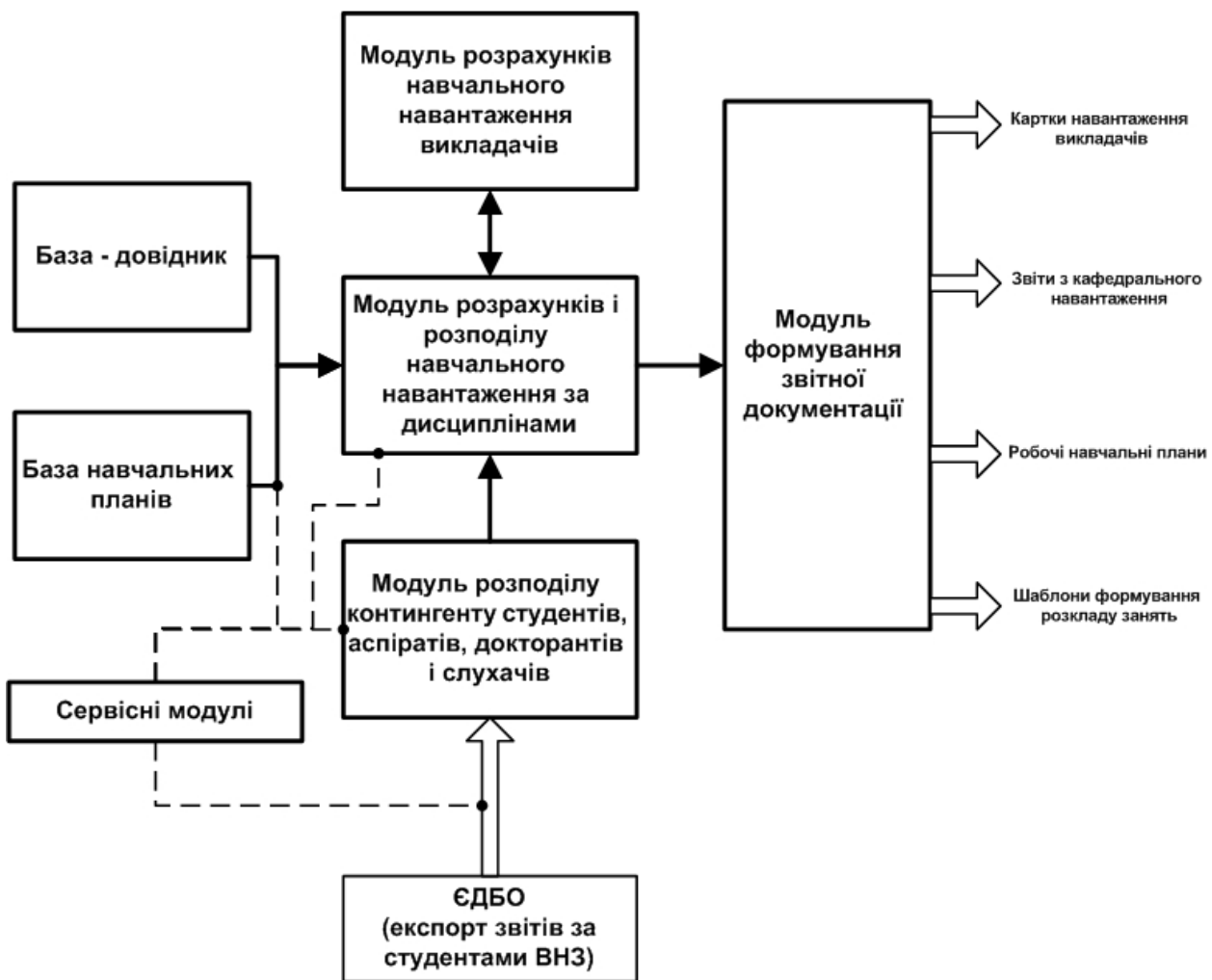


Рис. 1. Архітектура системи обліку навчального навантаження

кількість аудиторних годин дорівнює запланованим навчальним планом, вказаним в стовпці \$T\$.

Якщо дисципліна викладається не для потоку, то кількість аудиторних годин дорівнює меншому з запланованого навчальним планом або розрахованого за допоміжною формулою в стовпці \$B\$B значення. Саме ця формула містить залежність від

чисельності студентів у групі. Для зручності коефіцієнти цієї і інших формул, а також скорочення назв інститутів, кафедр і спеціальностей були винесені на окремий лист «Довідники» (рис. 3).

Виконаємо аналіз формули у стовпці \$B\$B:  
 =ЕСЛИ(\$E8="Ден.";ОКРВВЕРХ(ЕСЛИ(ИЛИ(\$B8="магістр";\$B8="аспірант");ЕСЛИ(\$I8

а)

б)

в)

Рис. 2. Модуль обліку видів занять та навчальних доручень



>Довідники!\$B\$1;\$T8;\$T8\*\$I8/Довідники!\$B\$1);ЕСЛИ(\$I8<Довідники!\$B\$2;\$T8\*\$I8/Довідники!\$B\$2;\$T8));Довідники!\$B\$41);ОКРВВЕРХ(ЕСЛИ(ИЛИ(\$B8="магістр";\$B8="аспірант")));ЕСЛИ(\$I8>Довідники!\$B\$1;\$T8;\$T8\*\$I8/Довідники!\$B\$1);ЕСЛИ(\$I8<Довідники!\$B\$2;\$T8\*\$I8/Довідники!\$B\$2;\$T8));Довідники!\$B\$45))

З метою збереження рівномірності розкладу занять було прийнято рішення про округлення вгору розрахованої кількості скорочених годин з різною кратністю: 12 – для денної форми навчання (Довідники!\$B\$41) та 6 – для заочної форми навчання (Довідники!\$B\$45) (2 – для кількості годин практик (Довідники!\$B\$42)). Залежність аудиторних годин від кількості студентів також має параметром освітній рівень студентів: для аспірантів та магістрів комплектною вважається група більше 10 осіб (Довідники!\$B\$1), а для спеціалістів і бакалаврів – більше 20 осіб (Довідники!\$B\$2) [13]. У разі якщо фактична чисельність групи (стовпець \$I) є комплектною, кількість аудиторних годин дорівнює плановим (стовпець \$T), в протилежному випадку кількість годин розраховується як планова кількість годин, помножена на фактичну кількість студентів та поділена на відповідні норми комплектності (20 для спеціалістів та бакалаврів та 10 для аспірантів та магістрів), наприклад, \$T8\*\$I8/Довідники!\$B\$1 для магістрів та аспірантів денної форми навчання. Зазначимо, що отримання нецілих значень не є проблемою, оскільки вони

округлюються до вказаних вище кратних значень.

Аналогічно введена залежність від чисельності груп студентів при розрахунках аудиторних годин лекцій, лабораторних робіт (для цього виду занять нормою для всіх освітніх рівнів вважається 10 осіб), керівництва практиками, консультацій протягом семестру [13]. Інші види навчальних занять та контрольних заходів обраховуються традиційно, відповідно до наказу [10].

Важливим елементом модулю обліку видів занять та навчальних доручень є реалізація розподілу навчального навантаження індивідуально для окремих видів навчальних доручень, які закріплюються за окремими студентами: керівництво курсовими роботами (проектами), дипломними роботами (проектами), практикою студентів, а також формування угруповань студентів на заняттях з іноземної мови, фізичного виховання тощо. Для цього передбачений стовпчик «Індивідуальний розподіл студентів» (Рис. 2в), у якому зазначається кількість студентів для такого навчального доручення. Врахування розподілу виконано таким чином (наводиться приклад для керівництва курсовими роботами (проектами)): =ЕСЛИ(ЕПУСТО(\$A\$8);ЕСЛИ(\$M8="+";\$I8\*Довідники!\$B\$5;0);ЕСЛИ(\$M8="+";\$A\$8\*Довідники!\$B\$5;0)). У разі, якщо у стовпчику «Індивідуальний розподіл студентів» відсутня кількість студентів, то функція ЕПУСТО(\$A\$8) повертає ИСТИНА, і виконується перша частина:

Кількість студентів в групі ОКР магістр	10	Інститут	Кафедра	Спеціальність
Кількість студентів в групі ОКР спеціаліст, бакалавр	20	ІМ	М	МЕТ
Час на перевірку контрольних робіт, год/роботу	0,33	ІМ	М	МЧМ
Час на перевірку ргр, гр, рр, год/роботу	0,5	ІМ	М	МКМ
Норма часу на курсові роботи (проекти), год/робота(проект)	3	ІМ	ОМТ	ОМТ
Норма часу на екзаменаційну консультацію, год/група	1	ІМ	МО	МБ
Норма часу на екзамен, год/ст.	0,25	ІМ	МО	МО
Керівництво дипломними роботами	16,5	ІМ	АУТП	АКТ
Керівництво бакалаврськими роботами	14,5	ІМ	АУТП	АТП
Керівництво магістерськими роботами (вконт.)	14	ІМ	УЗ	
Керівництво магістерськими роботами (1 курс)	0	ІБ	ПЦБ	БУД
Керівництво магістерськими роботами	22,5	ІБ	ПЦБ	ПЦБ
Рецензування дипломних робіт спеціалістів	2	ІБ	МБГ	МБГ
Рецензування дипломних робіт бакалаврів	1	ІБ	ВВ	ВР
Рецензування дипломних робіт магістрів	3	ІБ	ВВ	ВВ
Нормоконтроль	0,35	ІБ	МБГ	ТТПВ
Голова ЕК (захист)	0,33	ІБ	ЛЕОП	ЗНС
Голова ЕК (іспит)	0,33	ІБ	ЛЕОП	ОНС
Участь у ЕК (іспит)	0,33	ІБ	ЛЕОП	ЦБ
Участь у ЕК (захист)	0,33	ІБ	ЛЕОП	ОП
Керівництво аспірантами (очна)	25	ІБ	ПН	
Керівництво аспірантами (заочна)	25	ІБ	ІМЛК	
Керівництво здобувачами	12,5	ІЕЕІТ	ТЕ	ТЕ
Рецензування рефератів (асп.)	2	ІЕЕІТ	ГЕ	ГЕ

Рис. 3. Лист «Довідники» з коефіцієнтами формул та скороченнями

**ЕСЛИ(\$M8="+";\$I8\*Довідники!\$B\$5;0)**, яка для рядків з поміткою «+» у стовпчику «Курсові роботи (проекти)» розраховує кількість годин на керівництво курсовими роботами (проектами) для всієї групи або підгрупи. Якщо в стовпчику «Індивідуальний розподіл студентів» вказана певна кількість студентів, то в розрахунках кількості годин використовується саме вона.

Основна функція модулю обліку навантаження викладачів (рис. 4) – ведення переліку викладачів кафедри з їх посадами, науковими ступенями та вченими званнями, типу посади (штатний, штатний сумісник, сумісник) (штатний сумісник – викладач іншої кафедри, який викладає навантаження поточної кафедри).

За допомогою функції СУММЕСЛИ з модулю обліку видів навчальних занять та навчальних доручень (рис. 2б) підраховується сума годин для кожного викладача, наприклад, СУММЕСЛИ(Загальна!\$AK:\$AK;\$E2;Загальна!\$AJ:\$AJ). У цій формулі порівнюється прізвище та ініціали викладача, отримані в стовпчику \$E листа «Викладачі» із прізвища, ім'я та по-батькові таким чином: СЦЕПИТЬ(\$B2;" ";ЛЕВСИМВ(\$C2;1);".";ЛЕВСИМВ(\$D2;1);"." ) із значенням, введеним в стовпчик «Прізвище викладача» (\$AK) листа «Загальна». У разі, якщо вони співпадають, сумується кількість годин викладача у стовпчику «Всього» (\$AJ) листа «Загальна».

Модуль обліку навантаження викладачів передбачає можливість встановлення викладачу навантаження, що обраховується як за частками ставки, так і за погодинною оплатою (в останньому випадку проставляється помітка «+» у стовпчику «Погодинна оплата» (\$AN) листа «Загальна»). При цьому кількість годин погодин-

ної оплати обраховується за допомогою функції СУММПРОИЗВ, яка дозволяє обраховувати суму добуток елементів масивів, трактуючи нечислові елементи як нульові значення:

СУММПРОИЗВ((Загальна!\$AK\$8:\$AK\$1623=\$E2)\*

\*(Загальна!\$AN\$8:\$AN\$1623="+")\*(Загальна!\$AJ\$8:\$AJ\$1623)).

Ця формула працює наступним чином. Порівняння в перших дужках введеного в стовпчик «Прізвище викладача» (\$AK) листа «Загальна» прізвища та ініціалів викладача з такими в стовпчику \$E листа «Викладачі» повертає 1 при збігу прізвища або 0 в іншому випадку. Порівняння в других дужках аналогічно повертає 1 або 0 при знаходженні в стовпчику «Погодинна оплата» (\$AN) листа «Загальна» символу «+». Вираз у третій дужках повертає значення годин із стовпчика «Всього» (\$AJ) для кожного запису. Вочевидь добуток повернутих значень буде містити значення годин тільки у випадку, якщо вони проставлені як погодинна оплата, функція СУММПРОИЗВ підраховує їх суму для кожного викладача. Недоліком вказаного рішення є неможливість адресації всього стовпчика, що потребує відстеження верхньої межі діапазонів обчислень. Аналогічної мети можна було б досягнути за допомогою функції СУММЕСЛИМН, і вона не має вказаного недоліку:

СУММЕСЛИМН(Загальна!\$AJ:\$AJ;Загальна!\$AK:\$AK;\$E2; Загальна!\$AN:\$AN;"+"),

але вона доступна тільки починаючи з MS Excel 2007, що не завжди виконувалось у нашому випадку на комп'ютерах користувачів. Кількість годин, що обраховується як частка ставки, отримується відніманням від загальної кількості годин

	В	С	Д	Е	Ж	З	И	І	К	Л	М	Н	О	Р	Q	R	
	Прізвище	Ім'я	По-батькові	ПІБ	Посада	Штатний, сумісник	Науковий ступінь	Вчене звання	Звання навантаження	Інститут	Кафедра	Загальна кількість годин	Кільк. годин (загальний фонд)	Кільк. годин (погодинна оплата)	Кільк. ставок	Частка загального фонду	Частка спеціального фонду
Алексієвський	Дмитро	Геннадійович	Алексієвський Д.Г.	доцент	сум.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	68	68			0.11	0.83	0.17
Барченко	Олена	Миколаївна	Барченко О.М.	доцент	сум.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	311	311			0.52	0.89	0.11
Вакансія			Вакансія	доцент	шт.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	60	60			0.10	0.72	0.28
Вакансія(бак.)	Голова	Е.К.	Вакансія(бак.)Г.Е.	доцент	шт.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	9		9			0.67	0.33
Вакансія(маг.)	Голова	Е.К.	Вакансія(маг.)Г.Е.	доцент	шт.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	2		2			1.00	
Вакансія(слес.)	Голова	Е.К.	Вакансія(слес.)Г.Е.	доцент	шт.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	3		3			0.56	0.44
Довгаль	Володимир	Володимирович	Довгаль В.В.	доцент	шт.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	367	357	10	0.59	0.80	0.20	
Зінченко	Володимир	Юрійович	Зінченко В.Ю.	доцент	шт.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	630	630		1.05	0.80	0.20	
Курс	Юрій	Володимирович	Курс Ю.В.	професор	шт.сум.	д.н.	проф.		ІМ	АУПІ	40	40		0.07	0.43	0.57	
Маяйло	Наталія	Олександрівна	Маяйло Н.О.	доцент	шт.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	687	674	13	1.12	0.72	0.28	
Николаєно	Анатолій	Миколайович	Николаєно А.М.	професор	шт.	д.н.	проф.		ІМ	АУПІ	636	636		1.06	0.75	0.25	
Овчинникова	Ірина	Анатоліївна	Овчинникова І.А.	доцент	шт.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	575	575		0.96	0.62	0.38	
Пірок	Михайло	Юрійович	Пірок М.Ю.	зав.кафедрою	шт.	д.н.	проф.	200	ІМ	АУПІ	500	337	164	0.84	0.70	0.30	
Ремівен	Олеся	Володимирович	Ремівен О.В.	доцент	шт.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	169	169		0.28	0.76	0.24	
Скелько	Юрій	Сергійович	Скелько Ю.С.	доцент	шт.сум.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	77	77		0.13	0.97	0.03	
Шумиш	Сергій	Олександрович	Шумиш С.О.	доцент	шт.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	543	543		0.91	0.79	0.21	
Морщенок	Тетяна	Сергіївна	Морщенок Т.С.	доцент	шт.сум.	к.н.	доц.		ІМ	АУПІ	21	21		0.04	0.63	0.37	
Мандина	Світлана	Анатоліївна	Мандина С.А.	ст.викладач	шт.сум.	б.с.	б.з.		ІМ	АУПІ	21	21		0.04	0.63	0.37	

Рис. 4. Лист «Викладачі» з обрахунками годин, часток ставок та часток оплат загального та спеціального фонду

кількості годин з погодинною оплатою.

Розрахунок ставок ведеться від кількості годин, що обраховуються як частки ставки. При цьому передбачено врахування знижок норм навантаження окремим викладачам за виконання додаткових доручень (наприклад, завідуючим кафедрами). Такі знижки в годинах за необхідністю вказуються в стовпчику «Зниження навантаження» (стовпчик \$J) і враховуються при обчисленні частки ставки:

**ЕСЛИ(ЕПУСТО(\$J2);\$N2/600;\$N2/(600-\$J2)),**

Також модуль обліку навантаження викладачів розраховує частки оплати з загального та спеціального фонду на базі обчислення частки студентів бюджетної та контрактної форм навчання для кожного навчального доручення на листі «Загальна» (стовпчики \$AS та \$AT), при цьому дані беруться з модулю обліку контингенту студентів за допомогою функції ВПР:

**ЕСЛИ(\$A\$8="осінь";ВПР(\$H8;Контингент!\$A:\$G;7;0);ВПР(\$H8;Контингент!\$I:\$O;7;0)).**

В наведеному прикладі функція ВПР виконує пошук назви академічної групи (підгрупи) із стовпця \$H8 листа «Загальна» в двовимірному масиві \$A:\$G листа «Контингент» (рис. 5) та для знайденого значення у першому стовпці масиву повертає значення 7 стовпця – це частка контрактників у групі (підгрупі). Аналогічно з 6 стовпця отримується частка бюджетників.

Відмітимо широке використання функцій ИНДЕКС та ПОИСКПОЗ для приблизно тих же цілей, для яких використовувалась функція ВПР – пошук рядка символів на одному листі (довід-

нику) та повернення значень з цього листа із цього ж рядка, але з іншого стовпчика. Наприклад, на листі «Загальна» в стовпчику \$AO відтворюється посада викладача, яка береться з модулю обліку навантаження викладачів:

**ЕСЛИ(ЕПУСТО(АК8);"";ИНДЕКС(Викладачі!\$F:\$F;ПОИСКПОЗ(\$AK8;Викладачі!\$E:\$E;0))).**

Ця формула для заповнених прізвищ та ініціалів викладача в стовпці «Прізвище викладача» (\$AK) повертає відповідну посаду зі стовпчика \$F листа «Викладачі» (рис. 4). На відміну від функції ВПР, функції ИНДЕКС та ПОИСКПОЗ можуть повертати значення зі стовпчиків, які знаходяться як після, так і до стовпчика з рядком, який шукається. У випадку незнайденого відповідного рядку, обидві підходи повертають помилку #Н/Д, яка полегшує пошук та виправлення помилкових введень.

Модуль обліку навантаження викладачів також містить інструменти перевірки рекомендованих значень годин для окремих видів навчального навантаження. Ця функціональність досягнута використанням можливостей умовного форматування Excel. При цьому для аудиторних годин (які складаються з суми годин лекцій, практичних занять, семінарів та лабораторних робіт) та окремо годин лекцій розраховуються рекомендовані значення годин залежно від встановленої у ЗДІА норми для певних посад та наукових ступенів [13], а також від фактичної частки ставки, яка обраховується від загальної кількості годин (оплачуваних як частка ставки та за погодинною

	A	B	C	D	E	F	G	Q	R	S	T
1	Група	Бюджет	Контракт	Разом	ОКР	Частка бюджетників	Частка контрактників	Чисельність з ЄДЕБО			Чи співпадає
2	АТП-12-1а		8	8	бакалавр	0,00	1,00	АКІТ-16-16д	20		ИСТИНА
3	АТП-13-1	18	1	19	бакалавр	0,95	0,05	АКІТ-16-1мд	7		ИСТИНА
4	АТП-13-1а		9	9	бакалавр	0,00	1,00	АКІТ-16-1сд	5		ИСТИНА
5	АТП-14-1	23	1	24	бакалавр	0,96	0,04	АКІТ-16-1сз	4		ИСТИНА
6	АТП-14-1а	12		12	бакалавр	1,00	0,00	АТП-12-1з	8		ИСТИНА
7	АТП-14-1б	12	1	13	бакалавр	0,92	0,08	АТП-13-1	19		ИСТИНА
8	АТП-14-1з	5	1	6	бакалавр	0,83	0,17	АТП-13-1з	9		ИСТИНА
9	АТП-15-1	16		16	бакалавр	1,00	0,00	АТП-14-1	24		ИСТИНА
10	АТП-15-1м	5		5	магістр	1,00	0,00	АТП-14-1з	7		ИСТИНА
11	АКІТ-16-16д	15	5	20	бакалавр	0,75	0,25	АТП-15-1	16		ИСТИНА
12	АКІТ-16-1сд	5		5	спеціаліст	1,00	0,00	АТП-15-1м	5		ИСТИНА
13	АКІТ-16-1мд	7		7	магістр	1,00	0,00	БУД-12-1з	17		ИСТИНА
14	АКІТ-16-1сз		3	3	спеціаліст	0,00	1,00	БУД-12-2з	14		ИСТИНА
15	БУД-16-26д		13	13	бакалавр	0,00	1,00	БУД-12-3зт	17		ИСТИНА
16	БУД-16-16д	13	9	22	бакалавр	0,59	0,41	БУД-12-4зт	14		ИСТИНА
17	БУД-16-16да	7	4	11	бакалавр	0,64	0,36	БУД-13-1	20		ИСТИНА
18	БУД-16-16дб	6	5	11	бакалавр	0,55	0,45	БУД-13-1з	21		ИСТИНА
19	БУД-16-16з		12	12	бакалавр	0,00	1,00	БУД-13-2	15		ИСТИНА
20	БУД-16-1сд	7	1	8	спеціаліст	0,88	0,13	БУД-13-2з	14		ИСТИНА
21	БУД-16-1сз		5	5	спеціаліст	0,00	1,00	БУД-13-3	15		ИСТИНА

Рис. 5. Лист «Контингент» з даними контингенту студентів

оплатою) (стовпчик \$AH на рис. 6). У разі, якщо фактична кількість годин є меншою від рекомендованої, значення виділяється червоним кольором.

Аналогічно при перевищенні рекомендованих значень червоним кольором виділяються кількості годин на такі види навчальної роботи, як керівництво курсовими роботами (проектами), керівництво дипломними роботами та інші, на які є обмеження відповідно до Положення про планування та облік навантаження науково-педагогічних працівників у Запорізькій державній інженерній академії [4].

Одним з найбільш складних завдань виявилася розробка системи обліку змін навчального навантаження викладачів впродовж навчального року. Внаслідок прийняття-звільнення викладачів впродовж навчального року, зміни їхнього навчального навантаження та кількості контингенту студентів виникає потреба перерахунку частки ставки викладачам. Для викладачів з нормою 600 годин на 1 ставку з урахуванням спрощення, яке передбачає 10 періодів на навчальний рік, на початку яких фіксуються зміни навчального навантаження, була отримана рекурсивна формула обчислення частки ставки викладача  $K_i$ :

$$K_i = \sum_{j=1}^{10} \frac{N_i - N_{i-1}}{60 \cdot C_{R_j}}$$

де  $N_i$  та  $N_{i-1}$  – кількість годин викладача у поточному та попередньому періодах,

$C_{R_i}$  – кількість періодів, що залишилась до кінця навчального року,

$$N_0 = 0, C_{R_0} = 10$$

Частка ставки попереднього періоду фіксується для забезпечення рекурсії. На рис. 7 приведений приклад розрахунків часток ставок викладачів при змінах навчального навантаження впродовж навчального року.

Формула для останнього періоду обраховує частку ставки таким чином:  $AW2+(AX2/(300-(J2/2)))$ . Зазначимо, що формула враховує зниження норми навантаження окремим викладачам, значення часток ставок попередніх періодів після розрахунку замінювались на фіксовані значення для забезпечення рекурсії обчислень.

На листі «Підсумок» виводяться статистичні дані модулю обліку навчального навантаження викладачів (рис. 8).

Модуль обліку контингенту студентів (Лист «Контингент») містить дані чисельності академічних груп, підгруп та потоків (рис. 5). При цьому обраховуються частки студентів бюджетної та контрактної форми навчання для кожної академічної групи (підгрупи), які використовуються для підрахунку часток навантаження викладача, що оплачується з загального та спеціального фонду відповідно.

При заповненні рядків стовпця «Шифр групи» назвами груп, підгруп модулю обліку видів занять та навчальних доручень (рис. 2а) за допомогою

	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
ПІБ	Всього ауд.годин		Лекції	Перевірка контрольних робіт	Курсові роботи - макс 180 год	Заліски	Консультації перед екзаменами	Екзамени	Дипломні роботи - макс. 125 год на 1 ставку	ЕК - макс. 120 год	Аспірантура - макс. 250 год	Керівництво практикою - макс. 64 год	Консультації протягом семестру	Загальна кільк. годин	Кільк. ставок	
Алексієвський Д.Г.	36	60	16	36				1	3				4	68	0.11	
Баріщенко О.М.	166	124	75	76	3.0	6		4	16	79	2	50	15	12	311	0.52
Вакансія	32		14							60					60	0.10
Вакансія(бак.) Г.Е.	5		2								9				9	0.01
Вакансія(маг.) Г.Е.	1		0								2				2	0.00
Вакансія(спец.) Г.Е.	2		1								3				3	0.00
Довгаль В.В.	196	210	88	86	7.6	9		9	19	55			34	24	367	0.61
Зінченко В.Ю.	336	342	151	186	9.6	72		4	14	118	9		18	44	630	1.05
Куріс Ю.В.	16	16	10	16	17.2									7	40	0.07
Міняйло Н.О.	366	354	165	92	8.3	72		5	8	54	5	50	95	36	687	1.15
Ніколаєнко А.М.	255	276	153	132	8.9	192		4	15	78	14		12	37	636	1.06
Овчинникова І.А.	306	328	138	108	30.0	15		6	15	94	12		7	67	575	0.96
Пазюк М.Ю.	200	234	120	166	9.6	27		9	26	116	14		25	41	500	0.83
Ренгевич О.В.	90	150	41	68										19	169	0.28
Скалько Ю.С.	41	62	18	36	5.0			1	4					5	77	0.13
Шулман С.О.	290	386	130	130	21.8			7	21	15			40	53	543	0.91
Морщенок Т.С.	11		5							21					21	0.04
Манідіна Є.А.	17		5							21					21	0.04

Рис. 6. Лист «Викладачі» з перевіркою рекомендованих значень годин для окремих видів навчального навантаження

функції ВПР(\$H8;Контингент!\$I:\$O;4;0) у стовпці «Кількість студентів» відображається загальна чисельність угруповань, а у стовпцях «Частка бюджетників» та «Частка контрактників» – відповідні значення, розраховані на листі «Контингент» для поточного угруповання.

Також на листі «Контингент» розташований інструмент перевірки чисельності академічних груп за даними ЄДЕБО (рис. 5). Такі дані отримуються як звіт ЄДЕБО «Зведені дані по контингенту студентів» у форматі MS Excel. Після програмної обробки засобами VBA [14] та побудовою

зведених таблиць для академічних груп студентів ми отримуємо дані, що показані на рис. 5. Далі функцією =R2=ИНДЕКС(\$D:\$D;ПОИСКПОЗ(\$Q2;\$A:\$A;0);1) ми отримуємо значення ИСТИНА при збігу, або ЛОЖЬ – в протилежному випадку в стовпці «Чи співпадає». Невідповідність значень ініціює перевірку даних та приведення їх до актуальних як в системі, що описується, так і в ЄДЕБО.

Картки індивідуального навчального навантаження викладачів та звіт з навчального навантаження кафедри будуються на окремих листах

ПІБ	Посада	Штатний, сумісник	Науковий ступінь	Вчене звання	Значення навантаження	Годин до оплати	Ставок на оплату (вересень)	Рішниця годин	Годин до оплати	Ставок на оплату (жовтень)	Рішниця годин	Годин до оплати	Ставок на оплату (грудень)	Рішниця годин	Годин до оплати	Ставок на оплату (лютий)
Александровский Д.Г.	доцент	сум.	к.н.	доц.		66,32	0,11387		66,32	0,114	0	68,00	0,11	0,32	68,32	0,11
Барщенко О.М.	доцент	сум.	к.н.	доц.		320,96	0,53493	-9,7586	311,201	0,517	5	316,00	0,50	-4,7986	311,20	0,48
Вахасія	доцент	шт.	к.н.	доц.				60	60	0,111		60,00	0,50		60,00	0,50
Вахасія(бак.) Г.Е.	доцент	шт.	к.н.	доц.												
Вахасія(маг.) Г.Е.	доцент	шт.	к.н.	доц.												
Вахасія(спец.) Г.Е.	доцент	шт.	к.н.	доц.												
Довгаль В.В.	доцент	шт.	к.н.	доц.		366,36	0,6106	-9,5179	356,842	0,593	6	363,00	0,60	-5,1579	356,84	0,58
Заченко В.Ю.	доцент	шт.	к.н.	доц.		636,54	1,05923	-5,2771	630,263	1,049	9	639,00	1,06	-8,7371	630,26	1,03
Куріс Ю.В.	професор	шт. сум.	д.н.	проф.		53,32	0,08887	-12,96	40,36	0,066	14	54,00	0,09	-13,64	40,36	0,04
Мінцило Н.О.	доцент	шт.	к.н.	доц.		673,43	1,12238	0,52171	673,952	1,123	27	701,00	1,19	-27,048	673,95	1,10
Ніколаєнко А.М.	професор	шт.	д.н.	проф.		596,03	0,99338	40,4121	636,442	1,068	8	644,00	1,08	-7,5579	636,44	1,05
Овчарикова І.А.	доцент	шт.	к.н.	доц.		522,46	0,87077	52,1376	574,598	0,967	-16	559,00	0,94	15,5976	574,60	0,99
Лазюк М.Ю.	зав. кафедрою	шт.	д.н.	проф.	200	506,1	1,0102	-168,51	336,596	0,823	0	337,00	0,84	-0,406	336,60	0,84
Ренгевін О.В.	доцент	шт.	к.н.	доц.		457,23	0,76206	-288,27	168,96	0,228	-169			168,96		0,56
Скілько Ю.С.	доцент	шт. сум.	к.н.	доц.		98,66	0,16442	-21,97	76,68	0,124	27	104,00	0,17	-27,32	76,68	0,08
Шумилин С.О.	доцент	шт.	к.н.	доц.		297,63	0,50	246,38	543,01	0,95	-1	542,00	1,03	1,012	543,01	1,03
Морценок Т.С.	доцент	шт. сум.	к.н.	доц.				21,1275	21,1275	0,039	-1	20,00	0,04	1,1275	21,13	0,04
Мандина Є.А.	ст. викладач	шт. сум.	б.с.	б.з.				21,1275	21,1275	0,039	-1	20,00	0,04	1,1275	21,13	0,04

Рис. 7. Лист «Викладачі» з розрахунками часток ставок при змінах навчального навантаження впродовж навчального року

Підсумкова інформація кафедри				Кафедра автоматизованого управління технологіями			
За кількістю викладачів							
Посада викладача		Штатний, сумісник		Науковий ступінь		Вчене звання	
ректор		шт.	12	66,7%	д.н.	3	16,7%
проректор		шт. сум.	4	22,2%	к.н.	14	77,8%
декан		сум.	2	11,1%	б.с.	1	5,6%
заст. декана							проф.
зав. кафедрою	1						проф.
професор	2						проф.
доцент	14						доц.
ст. викладач	1						доц.
викладач							б.з.
асистент							
<b>РАЗОМ</b>	<b>18</b>	<b>100,0%</b>	<b>18</b>	<b>100,0%</b>	<b>18</b>	<b>100,0%</b>	<b>46</b>
За навантаженням							
Кількість	Годин	Ставок	%	Кількість	Годин	Ставок	%
ректор				д.н.	1177	1,96	24,94%
проректор				к.н.	3622	5,87	74,61%
декан				б.с.	21	0,04	0,45%
заст. декана							
зав. кафедрою	500	0,83	10,60%				
професор	677	1,13	14,34%				
доцент	3622	5,87	74,61%				
ст. викладач	21	0,04	0,45%				
викладач							
асистент							
<b>РАЗОМ</b>	<b>4720</b>	<b>8</b>	<b>100%</b>	<b>РАЗОМ</b>	<b>4720</b>	<b>8</b>	<b>100%</b>

Рис. 8. Лист «Підсумок» з статистичними даними навчального навантаження викладачів кафедри

за допомогою такого інструменту MS Excel, як створення зведених таблиць [15]. На рис. 9 наведений приклад звіту з індивідуального розподілу навантаження викладача. Форма звіту має панель фільтрів, на якій обираються зі списків: назва кафедри (для файлів кафедр у списку тільки назва поточної кафедри), прізвище викладача кафедри, посада викладача, форма навчання та ознака погодинної оплати у разі побудови картки розподілу навантаження за погодинною оплатою. Після обрання необхідних значень отримуємо звіт, під час друку якого у верхньому та нижньому колонтитулах передбачені місця для затверджуючого підпису проректора та погоджувальних підписів викладача та завідувача кафедрою. Аналогічним чином побудований звіт з навчального навантаження кафедри (рис. 10).

Описана система міститься в файлах, які заповнюються відповідальними за ведення навчального навантаження працівниками кафедр. Комірки з формулами при цьому захищені від змін і тільки відображають результат розрахунку, для можливості копіювання/видалення рядків навчальних дисциплін та доручень та записів для викладачів кафедр передбачені кнопки, які запускають підпрограми VBA, що реалізують таку функціональність на захищених листах (рис. 2а) та (рис. 4) відповідно.

Після заповнення файлів навантаження кафедр та розподілу навчального навантаження такі

файли надаються до навчального відділу, де вони програмним шляхом об'єднуються в єдиний файл з навчальним навантаженням всього ВНЗ [16]. Інформація у цих файлах використовується для отримання статистичних даних, прогнозування тощо.

**Висновки.** Для побудови обліку навчального навантаження запропоновано вважати повнокомплектними групами академічні групи чисельністю N не менше 20 осіб для освітнього рівня «бакалавр» та освітньо-кваліфікаційного рівня «спеціаліст» та не менше 10 осіб для освітнього рівня «магістр» та аспірантів. У разі меншої чисельності N аудиторне навантаження розраховується як добуток годин за навчальним планом та коефіцієнту N/20 (або N/10) відповідно до рівня вищої освіти, округлений вгору до 12 для денної форми навчання та до 6 для заочної форми навчання. Вказані значення округлення вибирались виходячи з фактичної тривалості семестру в ЗДІА (12 тижнів). Слід зауважити, що зменшення навантаження для малокомплектних груп компенсується самостійною роботою студентів та консультаціями як очно, так і з використанням сайту підтримки освітніх програм ЗДІА (<http://e-learn.zgia.zp.ua>).

У системі забезпечено врахування індивідуального розподілу студентів для окремих видів навчальних доручень, таких як курсові роботи (проекти), дипломні роботи, практики, заняття з

Індивідуальний розподіл навчального навантаження на 2016/2017 н.р.																				
Кафедра		автоматизованого управління технологічними процесами																		
Прізвище викладача		Осеченникова І.А.																		
Посада викладача		доцент																		
Форма навчання		Ден.																		
Погодинна оплата		(пусто)																		
Семестр року	Назва дисципліни та доручень	Семестр	Курс	Шифр груп	Числ. ст.	Лекц.	Лаб.р.	Практ.	КП(КР)	к.р., рпр., гр	Екс.клас.	Екс.	ДП(ДР)	Екс.ков.	Асп.	Керів. Практ.	Конс.	Всього год.	Інд.реп.ст.	
осінь	Введення до спеціальності	1	1	АКТ-16-16д	20	36,0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,8	52,8	
	Комп'ютерно-інтегровані системи управління	1	1	АКТ-16-1мд	7	8,0	10	0	0	0	1	1,75	0	0	0	0	0	1,5	22,3	
	Проектування систем автоматизації	5	3	АТП-14-1	24	0,0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2	25,2	
	Теорія автоматичного керування	7	4	АТП-13-1	19	0,0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,3	26,3	
	Теорія автоматичного керування	5	3	АТП-14-1а	12	0,0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	12,4	
	<b>осінь Ітого</b>					<b>44,0</b>	<b>70</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1,75</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>10,2</b>	<b>138,9</b>		
весна	Керівництво бакалаврськими роботами	8	4	АТП-13-1	19	0,0	0	0	0	0	0	0	67,43	0	0	0	0,0	67,4	5	
	Переддипломна практика	8	4	АТП-13-1	19	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,93	0,0	1,9	5	
	Участь у ЕК (захист)	2	1	АКТ-16-1сд	5	0,0	0	0	0	0	0	0	0	1,65	0	0	0,0	1,7		
	Автоматизація виробництва	8	4	АТП-13-1	19	0,0	0	0	0	0	0	0	0	6,27	0	0	0,0	6,3		
	Автоматизація технологічних процесів та виробництва	6	3	МЕТ-14-2	16	0,0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,0	13,0	
	Автоматизація технологічних процесів та виробництва	8	4	АТП-13-1	19	0,0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0,0	15,0	5	
	Автоматичне управління тепловими процесами	8	4	ТЕ-13-1	23	12,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2	13,2	
	Автоматичне управління тепловими процесами			ТЕ-13-1а	12	0,0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	12,4	
	Автоматичне управління тепловими процесами			ТЕ-13-1б	12	0,0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	12,4	
	Комп'ютерні системи керування, автоматизації та проє	8	4	ГЕ-13-1	15	0,0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9	12,9	
	Моделювання і оптимізація систем керування	6	3	АТП-14-1	24	24,0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0	0	3,6	34,6	
	Проектування АСК ТП			АТП-14-1а	12	0,0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7	24,7	
	Проектування АСК ТП	6	3	АТП-14-1а	12	0,0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7	24,7	
	Керівництво магістерськими роботами (1 курс)	2	1	АКТ-16-1мд	7	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	6,0	1
	<b>весна Ітого</b>					<b>36,0</b>	<b>84</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>67,43</b>	<b>7,92</b>	<b>0</b>	<b>1,93</b>	<b>8,8</b>	<b>249,1</b>	<b>16</b>	
	<b>Общий итог</b>					<b>80,0</b>	<b>154</b>	<b>24</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>7,75</b>	<b>67,43</b>	<b>7,92</b>	<b>0</b>	<b>1,93</b>	<b>19,0</b>	<b>379,0</b>	<b>16</b>	

Рис. 9. Звіт з індивідуального навантаження викладача

Обсяг навчальної роботи на 2016/2017 н.р.																						
Назва дисциплін та доручень	квартал	курс	Шифр груп	Ідентифікатор	Прізвище викладача	Посада викладача	Інк. ст.	Лінал.	Лекції	Практи.	Курсові	кр. пр. гр.	Екзаміни	Есе	ДПДР	Есе/сем.	Асп.	Керм. Проект.	Конс.	Всього год.		
																					1	2
Автоматизація виробництва	7	4	МЕТ-13-13а	(пусто)	Овчинникова І.А.	доцент	14	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,84	2,9
			МЕТ-13-13б	(пусто)	Шумкин С.О.	доцент	14	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,84	2,8
Автоматизація технологічних процесів та виробництва	7	4	АТП-13-1	(пусто)	Гризак М.Ю.	зав.кафедрою	19	35	0	38	0	0	1	4,75	0	0	0	0	0	0	5,84	85
				(пусто)	Зинченко В.Ю.	доцент	19	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,14	13
Бази даних в АСК ТП	9	5	АТП-12-13	(пусто)	Гризак М.Ю.	зав.кафедрою	8	6	6	0	0	2,54	0	0	0	0	0	0	0	0	3,84	16
				(пусто)	Резиден О.В.	доцент	8	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,85	15
				(пусто)	Шумкин С.О.	доцент	8	0	0	0	0	3,64	1	2	0	0	0	0	0	0	0,95	5,6
Введення до спеціальності	1	1	АІТ-15-10а	(пусто)	Овчинникова І.А.	доцент	20	35	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,6	53
Виробничі процеси та обладнання	3	2	АТП-15-1	(пусто)	Шумкин С.О.	доцент	16	35	0	24	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	5,75	71
Голова ЕК (захист)	5	3	АТП-14-1а	(пусто)	Шумкин С.О.	доцент	6	0	0	0	1,93	1	1,5	0	0	0	0	0	0	0	4,32	21
ГОМ у системах управління	3	2	АТП-15-1м	(пусто)	Васильченко М.Г.	доцент	5	0	0	0	0	0	0	0	1,7	0	0	0	0	0	0	1,7
			АТП-14-1	(пусто)	Миняло Н.О.	доцент	24	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2	13
			АТП-14-1а	(пусто)	Миняло Н.О.	доцент	12	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,72	25
			АТП-14-1б	(пусто)	Миняло Н.О.	доцент	13	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,78	25
			АТП-13-1а	(пусто)	Миняло Н.О.	доцент	9	6	4	0	0	2,97	1	2,25	0	0	0	0	0	0	3,24	18
Ідентифікація та верифікація технологічних об'єктів	5	3	АТП-14-1	(пусто)	Баріченко О.М.	доцент	24	24	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0	0	0	3,0	35
			АТП-14-1а	(пусто)	Баріченко О.М.	доцент	12	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,72	25
			АТП-14-1б	(пусто)	Резиден О.В.	доцент	13	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,78	15
				(пусто)	Шумкин С.О.	доцент	13	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,23	5,2
Інтелектуальні системи управління	1	4	АІТ-15-1сд	(пусто)	Резиден О.В.	доцент	5	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,5	26
				(пусто)	Миняло Н.О.	доцент	5	4	2	0	0	0	1	1,25	0	0	0	0	0	0	0,3	8,6
			АІТ-15-1св	(пусто)	Резиден О.В.	доцент	3	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,8	9,8
				(пусто)	Миняло Н.О.	доцент	3	2	2	0	0	0,99	1	0,75	0	0	0	0	0	0	0,4	7,1
			АІТ-15-1сг	(пусто)	Миняло Н.О.	доцент	1	2	2	0	0	0,33	0,65	0,25	0	0	0	0	0	0	0,6	5,2
Керівництво аспірантами (зочна)	5	3	АСПб	(пусто)	Миняло Н.О.	доцент	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	25
Керівництво аспірантами (очна)	3	2	АСПб	(пусто)	Баріченко О.М.	доцент	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	25
Керівництво майстерськими роботами	3	2	АТП-15-1м	(пусто)	Гризак М.Ю.	зав.кафедрою	5	0	0	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0	0	0	45
				(пусто)	Зинченко В.Ю.	доцент	5	0	0	0	0	0	0	22,5	0	0	0	0	0	0	0	22,5
				(пусто)	Баріченко О.М.	доцент	5	0	0	0	0	0	0	22,5	0	0	0	0	0	0	0	22,5

Рис. 10. Звіт з навчального навантаження кафедри

фізичного виховання тощо. Для кожного запису для дисципліни або навчального доручення по назві академічної групи (підгрупи, потоку) встановлюється чисельність вказаних угруповань відповідно до контингенту студентів. Є можливість напівавтоматичного корегування чисельності академічних груп відповідно до даних, отриманих експортом з ЄДЕБО.

Для кожного запису для дисципліни або навчального доручення у системі відповідно до даних контингенту розраховується частка годин навантаження бюджетних та контрактних студентів.

Ведеться підсистема викладачів кафедри, для яких автоматично розраховуються кількість годин за ставкою та кількість годин погодинної оплати, частка ставки з урахуванням прийнятих у ЗДІА посадових та персональних знижок, частка годин роботи з бюджетними та контрактними студентами. Ведеться перерахування частки ставки науково-педагогічних працівників при зміні навчального навантаження (та/або чисельності контингенту студентів) впродовж навчального року.

Розроблено підсистему генерування наступних звітів:

- підсумкова інформація по навантаженню викладачів кафедри;
- картка індивідуального розподілу навчального навантаження викладача кафедри;
- картка індивідуального розподілу навчального навантаження з погодинної оплати викладача кафедри;
- картка обсягу навчальної роботи кафедри

Система представляє собою набір файлів формату Microsoft Excel із реалізованими в них за допомогою функцій Excel макросів VBA та зв'язаних таблиць засобів, що реалізують описану функціональність. Систему впроваджено в Запорізькій державній інженерній академії, ефект від впровадження системи складається з підвищення рентабельності навчальної роботи, забезпечення аудиторними заняттями студентів малочисельних груп, підвищення зацікавленості викладачів та кафедр в наповненні контингенту студентів та його збереженні протягом навчання.

### Список літератури:

1. Гроза П.М. Застосування інформаційних технологій для автоматизації діяльності викладача вишу / П.М. Гроза, С.В. Сомов, О.П. Гроза, Т.С. Сайко. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 2. С. 209–211.
2. Білощицький А.О. Створення інформаційної технології управління навчальним процесом у ВНЗ / А.О. Білощицький, С.В. Білощицька, С.С. Білоконь. *Управління розвитком складних систем*. 2013. Вип. 13. С. 136–142.

3. Кузьма К.Т. Аналіз автоматизованих систем управління вищим закладом освіти. *Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій*. 2008. Т. 12. С. 134–144.
4. АСУ «ВНЗ». Автоматизована система керування ВНЗ всіх рівнів акредитації. URL: <https://vuz.osvita.net/ua/asu-vnz/as-dekanat/> (дата звернення 22.03.2019).
5. Автоматизована система управління вищим навчальним закладом III – IV рівня акредитації. ТОВ «Юнітех+». URL: <http://www.unitex.com.ua/products/commercial-software/automated-system-for-higher-education-institution/> (дата звернення 22.03.2019).
6. Автоматизована система для планування навчального процесу. *Інформаційно-обчислювальний центр забезпечення навчального процесу*. URL: <https://ivc.kpi.ua> (дата звернення 22.03.2019).
7. Петрович Й.М. Інформаційні системи управління навчальним процесом у ВНЗ: порівняльний аналіз / Й.М. Петрович, Ю.М. Римар. *Львівська політехніка. Вісник*. Львів : Львівська політехніка, 2012. № 735: Логістика. С. 167–175
8. Гриценко В.Г. Аналіз сучасного стану використання інформаційно-комунікаційних технологій в управлінні вищим навчальним закладом / В.Г. Гриценко. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету ім. Івана Огієнка. Серія : Педагогічна*. 2014. Вип. 20. С. 256–259.
9. Козин І.В. «Автоматизированная система «Деканат» / И.В. Козин, Т.В. Заховалко, С.В. Курапов. *Вісник запорізького державного університету*. 2003. № 1. С. 48–55.
10. Наказ МОНУ N 450 від 07.08.2002 «Про затвердження норм часу для планування і обліку навчальної роботи та переліків основних видів методичної, наукової й організаційної роботи педагогічних і науково-педагогічних працівників вищих навчальних закладів».
11. Лист МОНУ №1/9-496 від 16.09.2016 «Щодо роботи з малочисельними академічними групами».
12. Слепцова Л.Д. Программирование на VBA в Microsoft Office 2010. Москва : ООО «ИД Вильямс», 2010. 432 с.
13. Положення про планування та облік навантаження науково-педагогічних працівників у Запорізькій державній інженерній академії, затверджене рішенням Вченої ради ЗДІА від 08.09.2016 р, протокол № 9, зі змінами, затвердженими рішенням Вченої ради ЗДІА від 29.09.2016 р, протокол № 10, URL: [http://www.zgia.zp.ua/gazeta/pologennya\\_navantazheniya\\_NPP.pdf](http://www.zgia.zp.ua/gazeta/pologennya_navantazheniya_NPP.pdf) (дата звернення 22.03.2019).
14. Коломоєць Г.П. Програмна обробка даних ВНЗ, експортованих з ЄДЕБО. *Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2013)*. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Запоріжжя, 13-16 березня 2013 р) / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Академія наук вищої школи України, Запорізька обласна державна адміністрація, Класичний приватний університет. Запоріжжя: КПУ, 2013, с. 136–137.
15. Джелен Б., Александер М. Сводные таблицы в Microsoft Excel 2013. Москва : Вильямс, 2014. 448 с.
16. Коломоєць Г.П. Інформаційна система обліку навчального навантаження закладу вищої освіти / Г.П. Коломоєць, Є.М. Кісельов, А.В. Таранець. V Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. Кременчук : Кременчукський національний університет імені Михайла Остроградського, 2018. С. 133–134

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УЧЕТА УЧЕБНОЙ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ МАЛОЧИСЛЕННЫХ ГРУПП

*В статье рассматривается реализация модулей системы учета учебной нагрузки высшего учебного заведения с учетом малочисленных групп студентов средствами Microsoft Excel. Система внедрена в Запорожской государственной инженерной академии, эффект от внедрения системы состоит из повышения рентабельности учебной работы, обеспечения аудиторных занятий студентов малочисленных групп, повышение заинтересованности преподавателей и кафедр в наполнении контингента студентов и его сохранении на протяжении обучения.*

**Ключевые слова:** учебная нагрузка, малочисленные группы, модуль, количество академических часов, файл.

## INFORMATION SYSTEM FOR STUDYTIME ACCOUNTING ACCORDING TO LITTLE GROUPS

*This article discusses the modules realization of the system for studytime accounting of a higher education institution, taking into account the students small groups using Microsoft Excel. The system is implemented in the Zaporizhzhya State Engineering Academy, the system implementation effect consists of increasing the academic work profitability, providing classroom lessons for small groups students, increasing the interest of teachers and departments in filling the students contingent and preserving it throughout the education.*

**Key words:** studytime accounting, small groups, module, number of academic hours, file.



**Коцун В.І.**

ПВНЗ «Європейський університет»

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ СВІТЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВЕРТИКАЛЬНОГО КУТА РОЗХОДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА СВІТЛА У ПЛАНАРНІЙ СТРУКТУРІ

*Проведено комп'ютерне моделювання процесу змішування світлового випромінювання в залежності від вертикального кута розходження джерела світла у планарних рідкокристалічних (РК) структурах із використанням програмного продукту Zemax. Розглянуто характер зміни процесу змішування світлового випромінювання при вертикальних кутах розходження світлового випромінювання для тонких і широких джерел світла. Встановлено закономірності між типом джерела світла з різними вертикальними кутами розходження випромінювання та однорідністю розподілу світлового випромінювання, яке потрапляє в рідкий кристал. Визначено тип джерела випромінювання, що забезпечує однорідніший розподіл інтенсивності змішаного світлового потоку. Підтверджено можливість створення повноцінної планарної світловодної структури.*

**Ключові слова:** *планарні рідкокристалічні структури, моделювання, рідкі кристали, програмний продукт Zemax, розподіл світлового випромінювання, джерела світла.*

**Постановка проблеми.** Рідкокристалічні матеріали (РК) можуть використовуватися як робоче середовище для побудови не тільки логічно закінчених пристроїв оптичної оброблення інформації, але й окремих елементів і вузлів, які можуть використовуватися у складі оптоелектронних систем з іншими робочими середовищами, зокрема рідкокристалічними. Одним із перспективних напрямків розвитку засобів відображення інформації (ЗВІ) колективного користування є застосування електрокерованих світлорозсіювальних структур на основі РК-матеріалів. Однак у таких структурах рівномірність свічення пікселя та кут огляду визначаються переважно характеристиками розсіювального шару та взаєморозташуванням джерел випромінювання базових кольорів. Поліваріантність окремих елементів системи підсвічування ускладнює проведення експериментальних досліджень, тому актуальним є моделювання процесу поширення випромінювання в таких структурах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із перспективних напрямків застосування рідкокристалічних матеріалів є створення на їх основі планарних світловодних структур. Це базується на їх високій чутливості до зовнішнього електричного поля, яке дозволяє в широких межах змінювати показник заломлення РК-шару. Існуючі приклади реалізації таких планарних структур [1–3], з одного боку показують перспективність застосування рід-

кокристалічних матеріалів, а з іншого, висвітлюють основну проблему таких пристроїв. Труднощі реалізації РК-планарних структур полягають в необхідності узгодження оптичної густини шару РК з іншими елементами планарної світловодної структури, такими як керуючі електроди, шар оболонки тощо. У деяких випадках, зокрема під час застосування кремнієвих підкладок, створення планарного РК-світловода неможливе внаслідок високого значення показника заломлення базового матеріалу мікроелектроніки кремнію. Саме на основі цього матеріалу на сьогодні реалізовано більшість багатоелектродних структур, таких як TFT-матриці, РК-дисплеї. Вирішити цю проблему можна шляхом створення повноцінної планарної світловодної структури, яка б включала в себе серцевину та оболонку, безпосередньо в шарі РК-матеріалу. Такий підхід виключає необхідність узгодження оптичних властивостей РК та оточуючих його шарів та дозволяє застосувати вже існуючі багатоелектродні системи для створення принципово нових пристроїв оброблення оптичного сигналу [4–9].

Проведення експериментальних досліджень процесу розповсюдження світла в РК-структурах з електрично-керуваним розподілом показника заломлення ускладнюється декількома методологічними аспектами. Так, на відтворюваність експериментальних досліджень має суттєвий вплив спосіб введення випромінювання в шар РК та труднощі стабілізації структури на межі

розділу «рідкий кристал – повітря». Тому перед початком експериментальних досліджень необхідно провести комп'ютерне моделювання процесу розповсюдження світла в таких структурах.

**Постановка завдання.** Метою роботи – на основі комп'ютерного моделювання процесу «змішування» світлового випромінювання в залежності від вертикального кута розходження джерела світла здійснити оптимізацію основних конструктивних параметрів системи введення випромінювання в планарних структурах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Комп'ютерне моделювання процесу розповсюдження світла в шарах РК із нелінійним характером розподілу показника заломлення проводилось за допомогою спеціалізованого програмного продукту Zemax [9].

Zemax – це програмне забезпечення, яке широко використовується для оптичного моделювання. Програма створена Zemax Development Corporation of Bellevue, Washington (перед тим Focus Software). Вона використовується для моделювання й аналізу оптичних елементів, трасування непрямих променів випадкового світла, поширення випромінювання в рамках фізичної оптики. Програма Zemax використовується для моделювання оптичних систем, зокрема лінз і систем освітлення. За її допомогою можна змодельовати поширення світла через оптичні елементи: лінзи (включаючи асферичні та градієнтні), дзеркала і елементи дифракційної оптики. За допомогою програми Zemax можна змодельовати ефекти оптичних покриттів на поверхнях компонентів і створити стандартні діаграми розподілу інтенсивності для аналізу, зокрема

точкові діаграми та тривимірні графіки. Вона включає розширену бібліотеку асортименту лінз від різноманітних виробників. Особливості поширення світла в межах геометричної оптики будуть корисними там, де необхідно враховувати дифракцію, включаючи поширення лазерних променів, голографію та введення світла до одномодових оптичних волокон. Програма Zemax має потужні засоби для оптимізації моделювання лінз, автоматично коректує параметри для оптимізації продуктивності та зменшення аберацій.

Вхідним параметром для проведення моделювання був розподіл напрямку директора (довгої осі молекул) в шарі РК зображений на рис. 1, отриманий під час комп'ютерної симуляції, описаній у роботі [10]. Комп'ютерні симуляції молекулярних моделей виконані за допомогою



Рис. 1. Розподіл директора в шарі нематичного рідкого кристала, отриманий за результатами комп'ютерного моделювання при  $T=500$  К, стаціонарний стан під час прикладення зовнішнього електричного потенціалу

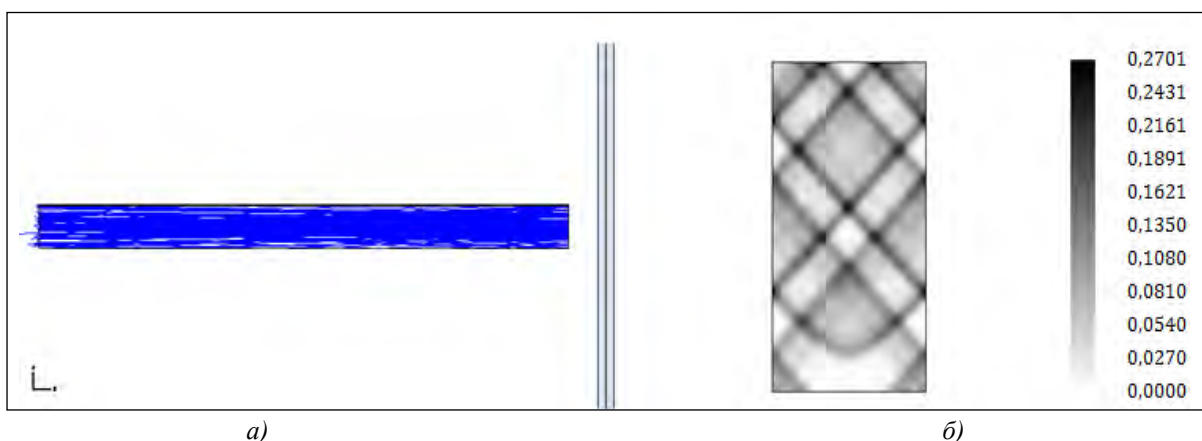


Рис. 2. Хід променів (а) планарною структурою та розподіл інтенсивності (б) на її виході, тонке джерело світла з вертикальним кутом розходження випромінювання  $30^\circ$

Моделювання проводилось для таких параметрів системи: значення показника заломлення скла – 1,5, РК – 1,65; товщина шару РК – 20 мкм, що дорівнює модельному значенню 300 відносних одиниць (в.о.). Під час моделювання використовувалось монохроматичне джерело випромінювання з довжиною хвилі 0,63 мкм [12].

У ході моделювання не враховувались розсіювальні властивості РК-матеріалів, що відповідає

гомеотропному стану шару немато-холестеричної суміші, а проводився лише просторовий розрахунок ходу променя планарною структурою [13]. Таке спрощення моделі дало змогу проаналізувати принципову можливість створення оптичних елементів на запропонованих структурах.

Для оптимізації основних конструктивних параметрів системи введення випромінювання у планарних структурах попередньо було проведено

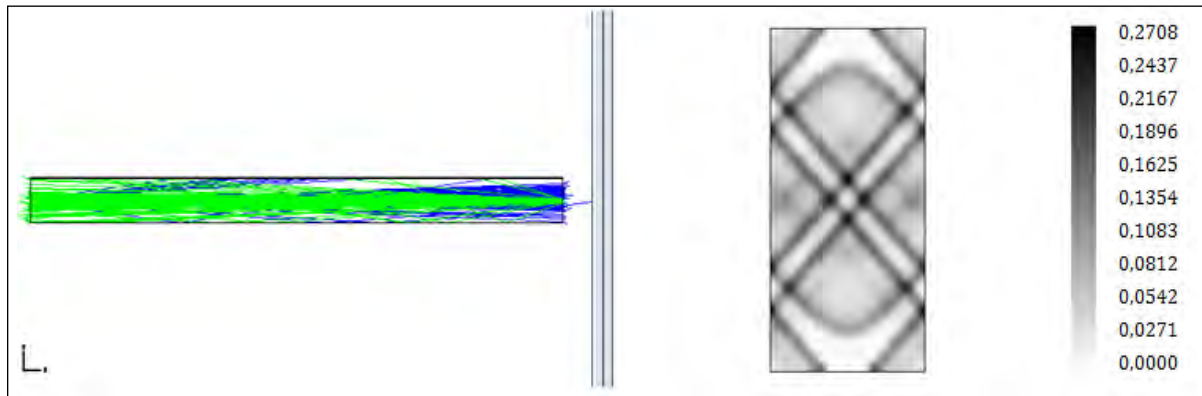


Рис. 3. Хід променів (а) планарною структурою та розподіл інтенсивності (б) на її виході, два тонких джерела світла з вертикальним кутом розходження випромінювання  $30^\circ$

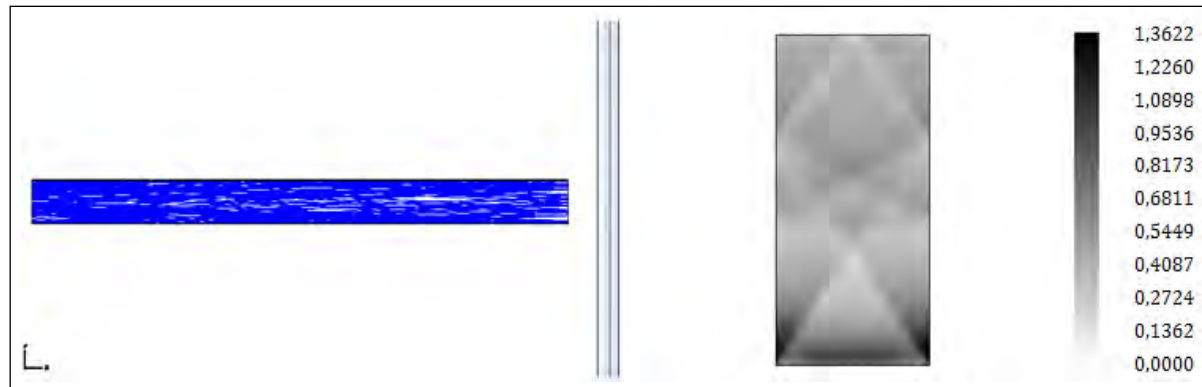


Рис. 4. Хід променів (а) планарною структурою та розподіл інтенсивності (б) на її виході, широке джерело світла з вертикальним кутом розходження випромінювання  $30^\circ$

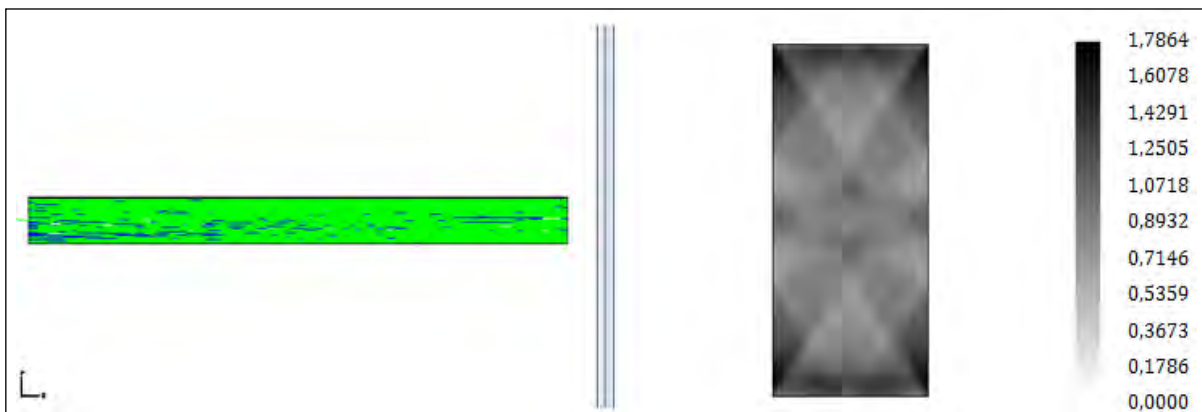


Рис. 5. Хід променів (а) планарною структурою та розподіл інтенсивності (б) на її виході, два широких джерела світла з вертикальним кутом розходження випромінювання  $30^\circ$

моделювання впливу системи введення світлового потоку на характер розподілу інтенсивності світлового випромінювання, описане в роботі [14]. Із дослідження видно, що двобічне введення випромінювання з широкого протяжного джерела в оптичний елемент забезпечує однорідніший розподіл інтенсивності і призводить до збільшення

області поширення випромінювання оптичним елементом.

Наступним етапом оптимізації конструктивних параметрів системи введення планарних структур було проведення моделювання процесу «змішування» світлового випромінювання в залежності від вертикального кута розходження джерела світла.

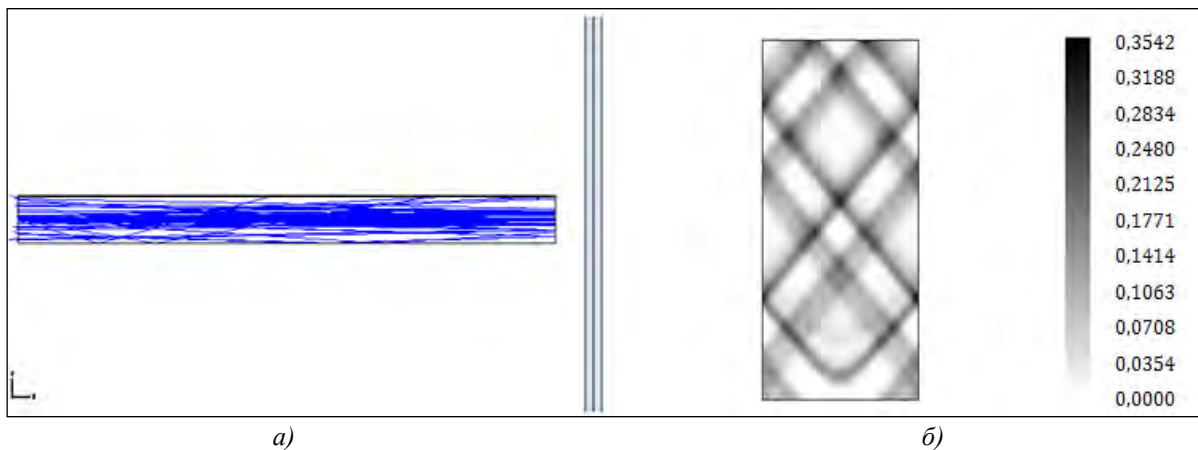


Рис. 6. Хід променів (а) планарною структурою та розподіл інтенсивності (б) на її виході, тонке джерело світла з вертикальним кутом розходження випромінювання  $60^\circ$

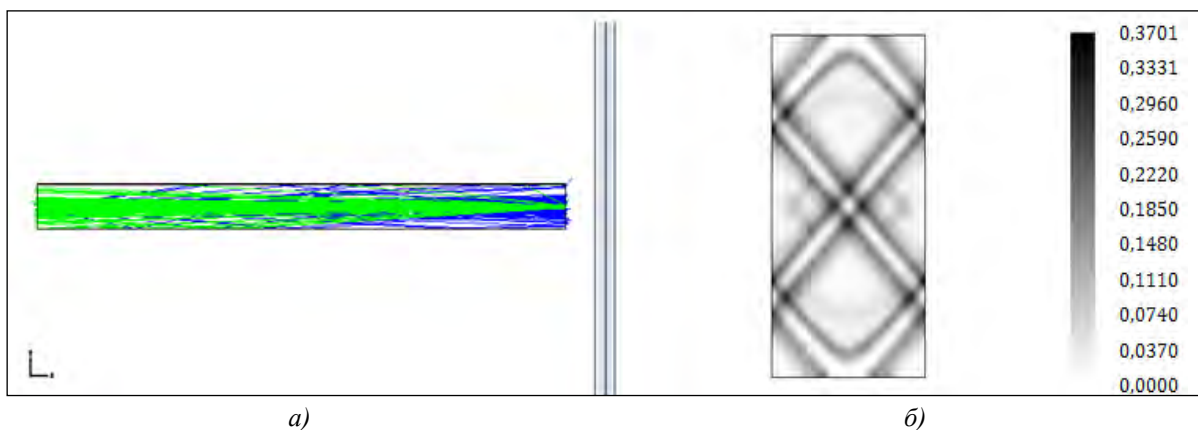


Рис. 7. Хід променів (а) планарною структурою та розподіл інтенсивності (б) на її виході, два тонких джерела світла з вертикальним кутом розходження випромінювання  $60^\circ$

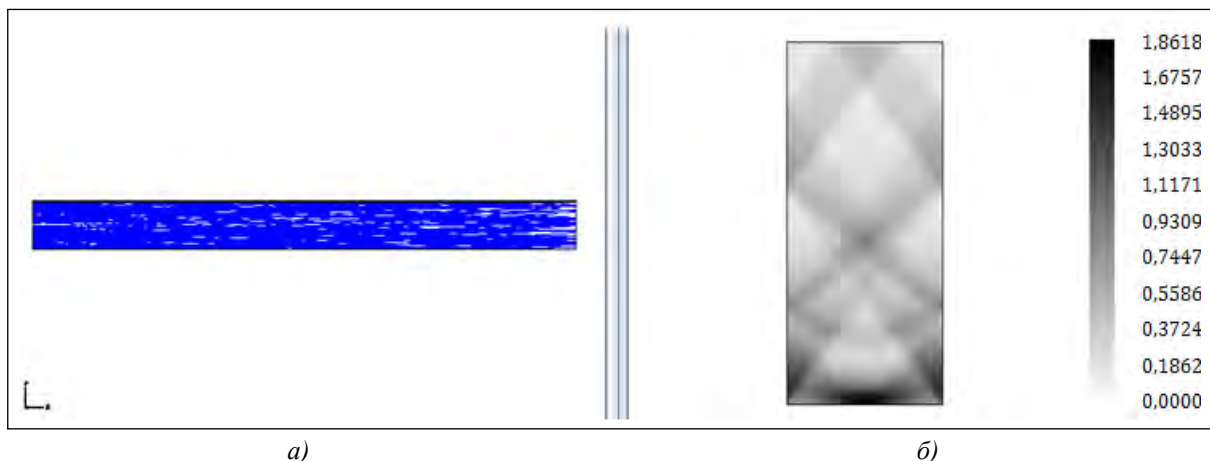


Рис. 8. Хід променів (а) планарною структурою та розподіл інтенсивності (б) на її виході, широке джерело світла з вертикальним кутом розходження випромінювання  $60^\circ$

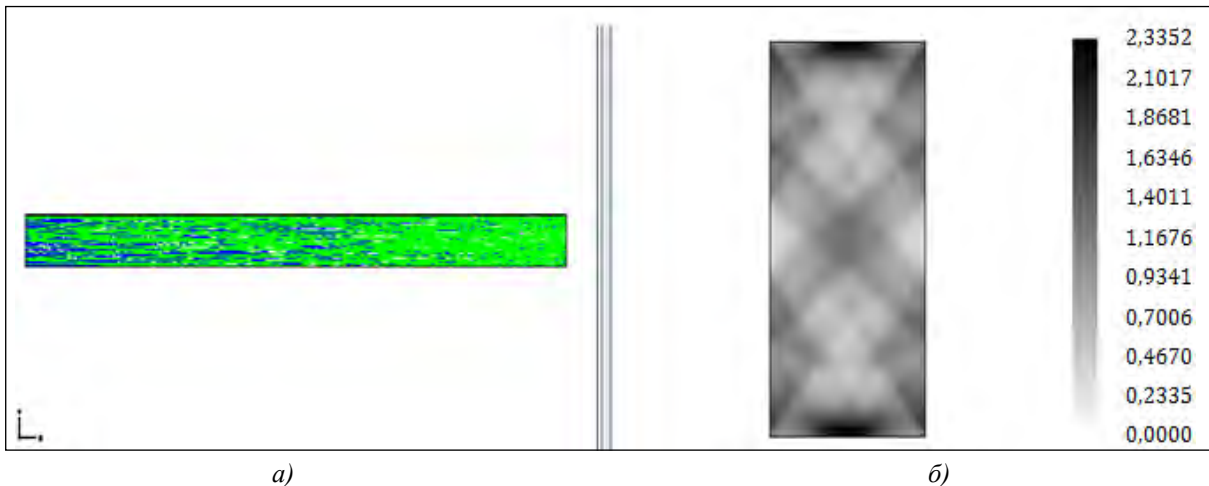


Рис. 9. Хід променів (а) планарною структурою та розподіл інтенсивності (б) на її виході, два широкі джерела світла з вертикальним кутом розходження випромінювання  $60^\circ$

Світлодіодні джерела світла характеризуються вертикальними та горизонтальними кутами розходження світлового випромінювання. У результаті моделювання отримано характер зміни «змішування» світлового випромінювання при вертикальних кутах розходження світлового випромінювання  $30^\circ$  і  $60^\circ$  для тонких (0,1 мм) і широких (1,5 мм) джерел світла (рис. 2 – 9).

**Висновки.** У результаті комп'ютерного моделювання процесу «змішування» світлового випромінювання в залежності від вертикального кута

розходження джерела світла визначено, що застосування широкого джерела випромінювання (1,5 мм) з вертикальним кутом розходження  $30^\circ$  забезпечує рівномірніше «змішування» світла у світловоді і дає однорідніший розподіл інтенсивності випромінювання світлового потоку на виході з планарної структури. Результати моделювання підтверджують можливість створення повноцінної планарної світловодної структури, яка б включала в себе серцевину та оболонку, безпосередньо в шарі РК-матеріалу.

#### Список літератури:

1. Brzdakiewicz K.A., Karpierz M.A., Fratalocchi A. Nematic liquid crystal waveguide arrays. *Opto-Electronics Review*. 2005. № 2. Vol. 13. P. 107–112.
2. Tyszkiewicz C., Pustelny T. Differential interferometry in planar waveguide structures with ferronematic layer. *Optika Applicata*. 2004. № 4. Vol. 34. P. 507–514.
3. Sukhorukov A.A., Kivshar Y.S., Eisenberg H.S. Spatial optical solitons in waveguide arrays. *IEEE J. Quantum Electron*. 2003. Vol. 39. P. 31–50.
4. Kalita W., Gotra O., Sushynskiy O., Ivanytskij V. The multifunctional sensor with an analog indicator. *The international conference on optoelectronic information technologies : Proceedings of the society of photo-optical instrumentation engineers (SPIE)*. 2001. Vol. 4425. P. 465–471.
5. Gotra Z., Gotra O., Mikityuk Z., Zayats R. Fibre-optic sensors on the base of liquid crystals. *Stadnyc Lightguides and their applications: Proceedings of the society of photo-optical instrumentation engineers (SPIE)*. 2000. Vol. 4239. P. 76–81.
6. Mikityuk Z., Lopatynskiy I., Gotra O., Dalanbalar B. Liquid crystal using in optical sensors. *International conference on optoelectronic information technologies : Proceedings of the society of photo-optical instrumentation engineers (SPIE)*. 2001. Vol. 4425. P. 472–477.
7. Hotra Z., Mykytyuk Z., Sushynskyy O. Sensor systems with optical channel of information transferring. *Przegląd elektrotechniczny*. 2010. Vol. 86. P. 21–23.
8. Hotra O., Lopatynskij I., Yavorskyj B. New electro-optical effect in nematic liquid crystal for integrated optics element. *Optoelectronic and electronic sensors : Proceedings of the society of photo-optical instrumentation engineers (SPIE)*. 2002. Vol. 4425. P. 112–114.
9. Hotra Z. Simulation of influence of limiting surfaces optical characteristics on liquid crystal waveguide properties. Z. Hotra, W. Wójcik, Z. Mykytyuk, A. Fechan, O. Sushynskyy, V. Kotsun, O. Chaban. The International Conference CADSM 2013. Polyana-Svalyava (Zakarpatya), Ukraine, 19–23 February 2013. P. 82.
10. Коцун В.І. Моделювання процесу формування градієнтного світловоду в шарі нематичного рідкого кристала. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання*. Харків : НТУ «ХПІ», 2014. № 35(1078). С. 121–126.

11. Pnytskyi J., Wilson M. A domain decomposition molecular dynamics program for the simulation of flexible molecules of spherically-symmetrical and nonspherical sites. II. Extension to NVT and NPT ensembles. *Computer Physics Communications*. 2002. Vol. 148. P. 43–58.

12. Фечан А., Шимчишин М., Левенець В.. Моделювання процесу розсіювання світла в планарних світловодах з рідкокристалічною серцевиною. *Технічні вісті. Орган Українського інженерного товариства у Львові*. 2007. 1(25), 2(26). С. 130–132.

13. Fechan A., Shymchyshyn M., Levenets. Modeling of the light scattering process in a planar waveguide with liquid crystal core. *Electronika*. 2008. № 6. P. 171–172.

14. Коцун В.І. Моделювання впливу системи введення світлового потоку на характер розподілу інтенсивності світлового випромінювання в планарній структурі. *Науковий журнал «Молодий вчений»*. 2016. № 2(29). С. 117–120.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕРТИКАЛЬНОГО УГЛА РАСХОДИМОСТИ ИСТОЧНИКА СВЕТА В ПЛАНАРНОЙ СТРУКТУРЕ**

*Проведено комп'ютерне моделювання процесу змішування світлового випромінювання в залежності від вертикального кута розходимості джерела світла в планарних жидкокристалічних (ЖК) структурах з використанням програмного продукту Zemax. Розглянуто характер зміни процесу змішування світлового випромінювання при вертикальних кутах розходимості світлового випромінювання для тонких і широких джерел світла. Встановлено закономірності між типом джерела світла з різними вертикальними кутами розходимості випромінювання і однорідністю розподілу світлового випромінювання, яке потрапляє в жидкий кристалл. Визначено тип джерела випромінювання, яке забезпечує більш однорідне розподілення інтенсивності змішаного світлового потоку. Підтверджено можливість створення повноцінної планарної світловодної структури.*

**Ключевые слова:** планарные жидкокристаллические структуры, моделирование, жидкие кристаллы, программный продукт Zemax, распределение светового излучения, источники света.

### **MODELING OF THE PROCESS FOR LIGHT RADIATION MIXING DEPENDING FROM VERTICAL ANGLE OF LIGHT SOURCE DISSOLUTION IN PLANARIAN STRUCTURE**

*A computer simulation of the process of light radiation “mixing”, depending from vertical angle of light source dissolution, in the planar liquid crystal structures by using the Zemax software, was carried out. The character of the changes of the process of light radiation “mixing” at vertical angle of light source dissolution for thin and wide light sources is considered. The regularities between of the light source type with different vertical angles of radiation dissolution and the uniformity of the light radiation distribution, which injected into liquid crystal, are established. The type of radiation source is determined, which provides a more uniform distribution of the intensity of the mixed light flow. The possibility of creating a full planar light-guide structure has been confirmed.*

**Key words:** planar liquid crystal structures, modeling, liquid crystals, Zemax software, distribution of light radiation, light source.

УДК 004.9

**Кравець Р.Б.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Сєров Ю.О.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Федушко С.С.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Ізонін І.В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## КОНСОЛІДОВАНИЙ ІНФОРМАЦІЙНИЙ РЕСУРС ПІДПРИЄМСТВ МЕДИЧНОЇ ГАЛУЗІ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ

У статті розроблено модель консолідованого інформаційного ресурсу підприємств медичної галузі Західної України. Здійснено ґрунтовний огляд популярних консолідованих інформаційних ресурсів медичних закладів міста Львів. Розроблено уніфіковану діаграму «сутність-зв'язок» консолідованого медичного інформаційного ресурсу. Здійснено моделювання процесу консолідації даних для інформаційного ресурсу підприємств медичної галузі Західної України. Описано використання технології видобування, перетворення і завантаження даних у процесі консолідації даних медичних закладів.

**Ключові слова:** консолідований інформаційний ресурс, медичне підприємство, веб-сайт, мережа Інтернет.

**Постановка проблеми.** Ураховуючи стрімкий розвиток процесу інформатизації суспільства, можна сказати, що кількість інформаційних ресурсів є надзвичайно великою, а спектр галузей використання є досить широким.

Сьогодні сайт-каталоги є одним із найефективніших способів поширення інформації. Для формування популярного інформаційного ресурсу з якісним, корисним та структурованим контентом [1–2] та для уніфікації та систематизації сайт-каталогу необхідно здійснити консолідацію інформації, отриманої з перевірених джерел. Проаналізувавши потреби сучасного користувача глобальної мережі Інтернет [3–6], для консолідації ми обрали інформацію про підприємства медичної галузі Західної України.

Основною метою роботи є здійснення аналізу різних джерел отримання інформації про продукцію підприємств медичної галузі Західної України та здійснення консолідації цих даних в один інформаційний ресурс. У роботі основними практичними задачами, які вирішуються в результаті використання проєктованого ресурсу, є:

- актуалізація цін медпродукції та медичних послуг;

- актуалізація інформації про продукцію медичної галузі;

- рейтингування підприємств медичної галузі, їх продукції та послуг;

- оперативне надання інформації про спеціалізовані медичні підприємства;

- облік відвідування та оцінювання;

- відстеження відгуків користувачів.

**Аналіз останніх досліджень.** На ринку онлайн-продажів спостерігаємо в наш час глобальні переми. Навзамін колишнім ефективним методам, покупці самостійно обирають продукцію: читають огляди та відгуки, порівнюють ціни в різних веб-сервісах. Заважаючи на вказані вище зміни, значно збільшилась популярність сайт-каталогів – маркетплейсів. Є стереотип, що сайт-каталог являє собою гігантський інтернет-магазин, який продає різноманітну продукцію. Але насправді маркетплейс сам не торгує продукцією, а консолідує в собі інформацію про ціни та опис багатьох інтернет-магазинів.

Потенційному продавцю не потрібно відвідувати десятки торгових майданчиків: вся необхідна для покупки інформація зібрана на одному сервісі – сайт-каталозі. Сайт-каталоги стають усе більш популярними. І все більше покупців віддають перевагу таким сервісам.

**Аналіз сайт-каталогів.** За даними веб-сайту Siteclinic [7], сайт-каталоги займають третє місце серед усіх сайтів у Google (рис. 1).

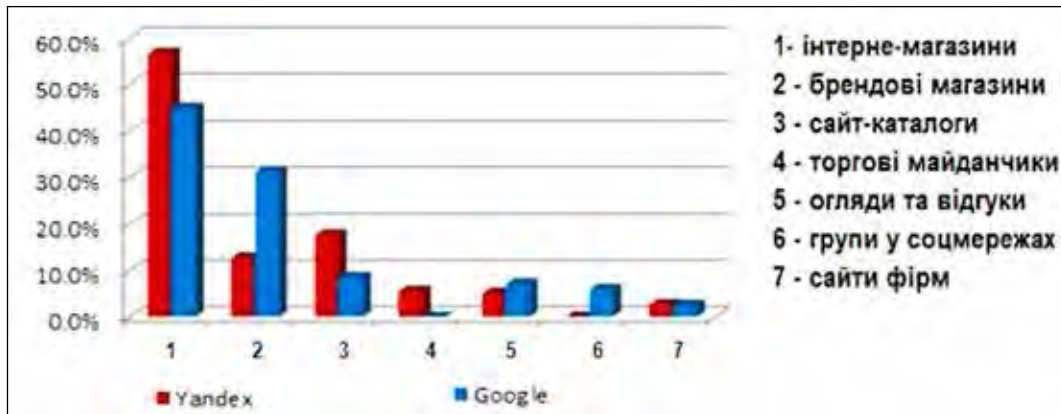


Рис. 1. Рейтинг веб-сайтів за запитами по продажам у Google та Yandex

Найбільше трафіку з Google за запитами по продажам дістається інтернет-магазинам. Веб-сайти підприємств із каталогами продукції, які дають можливість тільки подивитися продукцію та інформацію про неї без можливості придбати її на цьому сервісі, зустрічаються не часто в Google. Для того, щоб збільшити кількість покупців із таких сервісів Yandex та Google [8], необхідно додати інтернет-магазини в популярні сайт-каталоги. Зараз у мережі Інтернет є чимало загальнотематичних (Price, Aport, Yandex.Market, Torg.mail, Nadavi) та вузькотематичних (Techguru, MobiGuru) сайт-каталогів. Такий метод популяризації є результативним та дієвим для інтернет-магазинів, які розпочали свою діяльність та намагаються одержати трафік у конкурентних сферах.

Сайт-каталоги виконують функцію агрегаторів інформації, структурованих і наповнених на основі асортименту продукції, запропонованого веб-сайтами, що до них приєднуються. Користувачі таких сервісів найчастіше їх використовують для швидкого пошуку необхідної продукції,

детального опису та відгуків про продукт, порівняння цін і умов доставки цікавого їм товару від різних продавців. Для веб-сайтів установ сайт-каталоги є одним із каналів отримання клієнтів, які вже є потенційними покупцями і відрізняються високою зацікавленістю в тому чи іншому продукті. Послугами сайт-каталогів користуються інтернет-користувачі закордоном та в Україні. Згідно зі статистичними даними сервісу Alexa [9] рейтинг закордонних сайт-каталогів очолюють шість сайт-каталогів (рис. 2):

Якщо інтернет-магазин працює в конкурентній сфері, то його конкурентоспроможність має бути високою, рівень продажів може бути невисоким, а вартість переходу на сайт-каталог – доволі високою. Ефективність розміщення на різних майданчиках теж може досить сильно різнитися. Ці нюанси необхідно враховувати і проводити дослідження, протиставляючи ефективність різних ресурсів. Аналітика і відстеження ефективності розміщення є джерелом до збільшення продажів товарів.

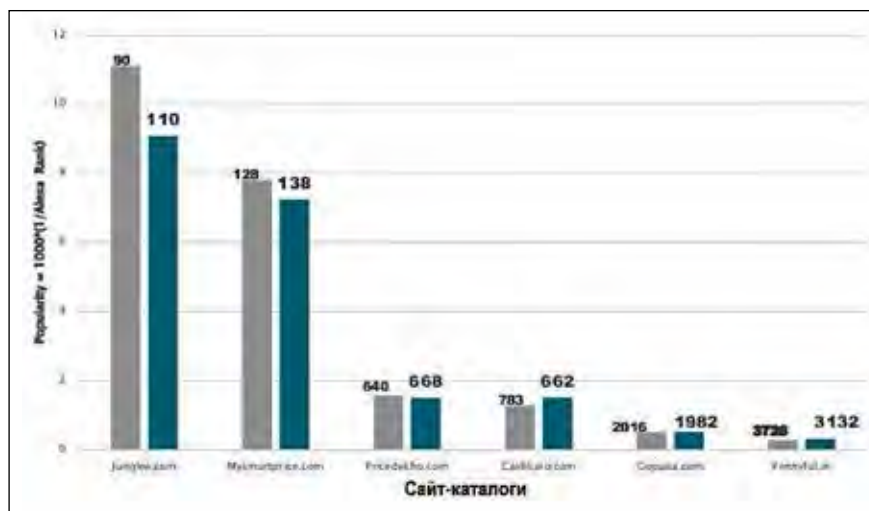


Рис. 2. Рейтинг сайт-каталогів (Alexa)



Сайт-каталоги – функціонально розширені каталоги продукції та консолідованої про цю продукцію інформації. Сайт-каталоги є оптимізованими для розширеного та швидкого пошуку і зручного порівняння продукції будь-якого покупця.

**Огляд популярних консолідованих інформаційних медичних ресурсів.** На ринку України є сотні медичних сайт-каталогів, рейтинг медичних інформаційних ресурсів у Львові за 2019 рік [10] представлено в табл. 1. Аналіз контенту, функціоналу та специфіки медичних віртуальних сервісів [11; 12] та онлайн-спільнот [13–15] збільшує ефективність управління спільнотою та підвищує популярність [16] цих медичних веб-сервісів серед користувачів мережі Інтернет. Ключовими параметрами сайт-каталогу відповідно до цього рейтингу є: відвідуваність, ціна за клік, кількість трафіку, конвертація кліків у замовлення, підключення, підтримка та звітність.

Сайт-каталоги являють собою функціонально розширені каталоги товарів, оптимізовані для швидкого пошуку [17; 18] і зручного порівняння продукту потенційним покупцем.

**Діаграма «сутність-зв'язок» консолідованого інформаційного ресурсу продукції підприємств медичної галузі.** Для зберігання даних про продукцію підприємств медичної галузі Західної України та ефективного функціонування розробленого консолідованого інформаційного ресурсу необхідно створити базу даних сайт-каталогу для порівняння продукції підприємств медичної галузі Західної України. І саме моделювання діаграми «сутність-зв'язок» передбачає наочне представлення структури цієї системи у вигляді сутностей та їх атрибутів, які пов'язані між собою за допомогою зв'язків. Діаграми «сутність-зв'язок» призначені для створення моделей даних. Діа-

грами «сутність-зв'язок» забезпечують уніфікований спосіб дефініції даних і взаємозв'язки цими даними. Практично за допомогою діаграми «сутність-зв'язок» відбувається деталізація сховищ даних проєктованої системи [19], а також документуються сутності системи і способи їх взаємодії, враховуючи ідентифікацію об'єктів, визначних для предметної області, атрибутів цих об'єктів та їх відношень з іншими об'єктами. Моделювання діаграми «сутність-зв'язок» передбачає наочне представлення структури інформаційної системи у вигляді сутностей та їх атрибутів, які певним чином пов'язані між собою. Загальна кількість сутностей діаграми – 5, загальна кількість зв'язків між ними – 6. Під час моделювання було використано обов'язкові зв'язки типу «один – до багатьох». Створено діаграму «сутність-зв'язок» консолідованого інформаційного ресурсу підприємств медичної галузі Західної України (рис. 3). Важливими сутностями, що знаходять своє відображення в роботі сервісу, є Продукція та Сайт-каталог. Діаграма «сутність-зв'язок» показує основних учасників та предмети їх взаємодії, показуючи зв'язки між кожним структурним елементом.

На діаграмі «сутність-зв'язок» консолідованого інформаційного ресурсу підприємств медичної галузі Західної України представлено п'ять сутностей: Підприємство, Сайт-каталог, Продукція, Користувач, Звітність.

Кожна із цих сутностей містить чіткий перелік атрибутів, серед сутностей є обов'язкові, які позначені знаком # біля назви атрибуту, та необов'язкові. Сутності пов'язані між собою за допомогою зв'язків. Сутності пов'язані зв'язками двох типів: «один – до багатьох» та «багато – до багатьох».

Таблиця 1

Рейтинг медичних інформаційних ресурсів у Львові (топ-10)

№	Ресурс	Хостів із регіона	Усього хостів	% заходів із регіона
1	UkrHealth – портал про здоров'я	383	7 003	5,47%
2	MedFond.com (Медфонд)	219	1 906	11,49%
3	Likar.INFO – пошук ліків, консультації онлайн.	147	20 235	0,73%
4	Країна здоров'я. Лікування та профілактики захворювань	117	2 316	5,05%
5	Медичний портал EUROLAB: новини медицини, здоров'я от А до Я, on-line консультації	116	10 704	1,08%
6	Medinfo.ua – медичний інформаційний портал	93	2 141	4,34%
7	Видавничий дім «Заславський», література для працівників медицини і фармації	83	3 704	2,24%
8	Мережа стоматологічних клінік «Пародент»	67	266	25,19%
9	портал medicina.ua	52	2 217	2,35%
10	HnB.com.ua – Твій портал про здоровим спосіб життя	51	8 925	0,57%

Сутність Продукція містить інформацію, що стосується продукції, якою торгують підприємства медичної галузі Західної України. Сутність Продукція є однією з основних сутностей діаграми, бо за допомогою зв'язків поєднується із чотирма іншими сутностями: Сайт-каталог, Підприємство, Користувач, Звітність. Сутність Підприємство містить інформацію про підприємства медичної галузі, які розташовані в Західній Україні. Також ця сутність містить відгуки покупців продукції даних підприємств та дані про рейтингові списки підприємств медичної галузі Західної України. Сутність Сайт-каталог містить інформацію про консолідований інформаційний ресурс підприємства медичної галузі Західної України, зокрема контактні дані. Сутність Сайт-каталог є однією з основних сутностей діаграми, бо за допомогою зв'язків поєднується із чотирма іншими сутностями, такими як: Підприємство, Користувач, Звітність та Продукція. Сутність Звітність містить статистичну та звітну інформацію про функціонування консолідованого інформаційного ресурсу підприємства медичної галузі Західної України.

Сутність Звітність є однією з основних сутностей діаграми, бо за допомогою зв'язків поєднується із чотирма іншими сутностями: Підприємство, Користувач, Сайт-каталог та Продукція. Сутність Користувач містить усю інформацію про користувачів консолідованого інформаційного ресурсу підприємства медичної галузі Західної України. Сутність Користувач є однією з основних сутностей діаграми, бо за допомогою зв'язків поєднується із чотирма іншими сутностями: Підприємство, Звітність, Сайт-каталог та Продукція. За результатами проектування діаграми «сутність-зв'язок» консолідованого інформаційного ресурсу підприємств медичної галузі може бути спроектована відповідна база даних як одна зі складових частин системи порівняння продукції та цін.

**Використання технології видобування, перетворення і завантаження даних у процесі консолідації даних.** Комплекс методів і процедур, спрямованих на вилучення даних із різних джерел, забезпечення необхідного рівня їх інформативності та якості, перетворення в єдиний формат, в якому вони можуть бути завантажені у схо-



Рис. 3. Діаграма «сутність-зв'язок» консолідованого інформаційного ресурсу підприємств медичної галузі Західної України

вище даних або аналітичну систему, називається консолідацією. Для отримання даних застосовують такі методи:

**Пошук джерел інформації** – цілеспрямовані дії з виявлення джерел інформації, визначення їх основних характеристик (достовірності, несуперечності, своєчасності) та аналізу сенсу переданих відомостей.

**Спостереження** – цілеспрямовані дії із систематичного отримання інформаційних відомостей з інформаційних джерел шляхом відбору і рестрації поширюваних відомостей. Спостереження може бути безперервним, періодичним, контрольним.

Консолідація даних є початковим етапом реалізації аналітичного завдання або проекту. Місце консолідації в загальному процесі аналізу даних може бути представленим у вигляді структурної схеми (рис. 4).

**Інтеграція даних** – це об'єднання даних, які спочатку вводяться в різні системи. Самі ці системи можуть розташовуватися в одній локальній мережі, але мати різні платформи і внутрішню архітектуру.

**Витягання даних** – це процес вибірки даних з оперативних баз даних і інших джерел. Для витягання даних існує безліч інструментів, включаючи засоби, призначені для користувача програми витягання, і комерційні продукти витягання даних. У більшості випадків під час витягання

даних із баз даних не виникає проблем, оскільки структура даних у них жорстко задана, відповідає певним стандартам і загальноприйнятим вимогам. Лише небагато джерел даних забезпечують задовільний контроль інформації.

**Завантаження даних** – запис перетворених даних у відповідну систему зберігання (базу даних). Процес видобування даних у рамках ETL істотно залежить від типів і структури джерел даних.

**Висновки.** У час інтенсивної інформатизації всіх галузей людської діяльності ще досі не розроблено узагальненого, систематизованого інформаційного ресурсу, що охоплював би дані про підприємства медичної індустрії, їх продукцію та послуги. Розроблення ресурсу є корисним для інформування користувача мережі Інтернет про стан розвитку медичної галузі. Зокрема, це інформування потенційних покупців із метою надання довідкової інформації та популяризації медичної галузі. Досліджено специфіку даних, що зберігалися в консолідованому інформаційному ресурсі підприємств медичної галузі Західної України. Відповідно до специфіки визначено вимоги до відображення даних у проекті та форми подання знань у ньому. Наведено обґрунтування вибору інформації для консолідації та способу її накопичення і збереження. За допомогою методології моделювання ERD змодельовано механізми та принципи функціонування інформаційних пото-



Рис. 4. Процес консолідації даних для консолідованого інформаційного ресурсу підприємств медичної галузі Західної України

ків. Створення консолідованого інформаційного ресурсу підприємств медичної галузі Західної України вирішило проблему вибору медичної продукції та послуг для потенційних клієнтів. У

мережі Інтернет не було такого узагальненого, систематизованого інформаційного україномовного ресурсу, що охоплював би всі великі підприємства медичної галузі в Західній Україні.

#### Список літератури:

1. Жежнич П.І. Технології інформаційного менеджменту. Львів. 2010. 260 с.
2. Пелешішин А., Кравець Р., Серов Ю., Федушко С. Методи відстеження появи небажаного інформаційного наповнення Веб-форуму. *Інформаційні системи та мережі*. Львів. 2010. № 689. С. 303–312.
3. Fedushko S. Disclosure of web-members personal information in Internet. Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті (СІТЕМ-2010). Львів. 2010. С. 163–165.
4. Пелешішин А., Серов Ю., Федушко С. Розроблення алгоритму реєстрації та валідації персональних даних учасників Веб-спільноти. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. Львів. 2010. № 686. С. 238–244.
5. Трач О.Р. Структура програмного засобу організації життєвого циклу віртуальних спільнот. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Технічні науки*. 2018. Т. 29(68). № 5. Ч. 2. С. 72–77.
6. Fedushko S., Biluschak H., Syerov Yu. Statistical methods of virtual community users age verification. *International Journal of Mathematics and Computational Science*. Vol. 1. № 3. 2015. P. 174–182.
7. Siteclinic. URL : <https://siteclinic.ua/>.
8. Фактори, що впливають на ранжування комерційних сайтів у Google та Yandex. URL : <https://site-analyzer.ru/articles/factori-ranjirovaniya-2019/>.
9. Alexa. URL : <http://www.alexa.com/>.
10. Bigmir. Рейтинг по групі Медицина. URL : <http://top.bigmir.net/show/medicine/?u=14&t2=0&o=h>.
11. Shakhovska N., Holoshchuk R., Fedushko S., Kosar O., Danel R., Repka M. The sequential associative rules analysis of patient's physical characteristics. *CEUR Workshop Proceedings. IDDM*. 2018. Vol. 2255. 2018. P. 82–92.
12. Fedushko S., Shakhovska N., Syerov Yu. Verifying the medical specialty from user profile of online community for health-related advices. *CEUR Workshop Proceedings. IDDM*. 2018. Vol. 2255. 2018. P. 301–310.
13. Трач О., Вус В. Визначення параметрів показників організації життєвого циклу віртуальних спільнот. *Вчені записки ТНУ ім. В. Вернадського. Технічні науки*. 2019. Т. 30(69). № 1, ч. 1. С. 143–148.
14. Fedushko S. Development of verification system of socio-demographic data of virtual community member. *Radio Electronics Computer Science Control*. Vol. 3. 2016. P. 87–92. DOI : 10.15588/1607-3274-2016-3-11.
15. Федушко С., Мельник Д., Серов Ю. Аналіз функціонування та організації віртуальних комунікативних середовищ українських науковці. *Вісник НУ ЛПІ: Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2011. 732. С. 293–305.
16. Білушак Т., Монастирська М. Вплив інформаційно-рекламного забезпечення діяльності підприємства у пошуку персоналу. *Інформація, комунікація, суспільство (ICS-2018)*. Львів. 2018. С. 268–269.
17. Clark D. Shopbots become agents for business change. *IEEE Computer*. Vol. 33. Issue 2. 2000.
18. Вовк Н. Особливості захисту інформації у документних потоках. *Інформаційна освіта та професійно-комунікативні технології XXI століття*. Одеса. 2012. С. 10–103.
19. Семеренко Л., Федушко С. Модернізація інформаційного ресурсу засобами CMS WordPress. *Інформація, комунікація, суспільство (IKC-2018)*. 2018. С. 67–68.

#### КОНСОЛИДИРОВАННЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ РЕСУРС КОМПАНИЙ МЕДИЦИНСКОЙ ОТРАСЛИ ЗАПАДНОЙ УКРАИНЫ

В статье разработана модель консолидированного информационного ресурса предприятий медицинской отрасли Западной Украины. Осуществлен основательный обзор популярных консолидированных информационных ресурсов медицинских учреждений города Львов. Разработана унифицированная диаграмма «сущность-связь» консолидированного медицинского информационного ресурса. Осуществлено моделирование процесса консолидации данных для информационного ресурса предприятий медицинской отрасли Западной Украины. Описано использование технологии добычи, преобразования и загрузки данных в процессе консолидации данных медицинских учреждений.

**Ключевые слова:** консолидированный информационный ресурс, медицинская компания, веб-сайт, сеть Интернет.

**CONSIDERED INFORMATIONAL RESOURCE**

**ENTERPRISES OF MEDICAL INDUSTRY OF WESTERN UKRAINE**

*In the article the model of the consolidated information resource of the enterprises of medical industry of Western Ukraine is developed. A thorough overview of popular consolidated information resources of medical institutions of the Lviv city is conducted. A unified “entity-relationship” diagram of the consolidated medical information resource is developed. The modeling data of consolidation information resource for enterprises of medical industry in Western Ukraine is implemented. The use of technology for the extraction, transformation and loading of data in the process of data consolidation of medical companies is described.*

**Key words:** *consolidated information resource, medical company, website, Internet.*

УДК 528.7:629.78

**Лобачев М.В.**

Одесский национальный политехнический университет

**Мещеряков Д.В.**

АО «PETROSOFT»

## НЕЧЕТКИЙ КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

*Рассмотрено преобразование признакового пространства данных биологического объекта, находящегося в канале обратной связи управляющей системы. Предложено разделение признакового пространства на главное и вспомогательное, содержащее информацию о динамике перестройки систем организма. Рассмотрено формирование тренда развития процесса по центрам главного кластера, что обеспечило возможность выделения первичных признаков для принятия решения по управлению направлением изменения воздействия на биологический объект.*

**Ключевые слова:** инфракрасная система, биологическая обратная связь, значимые признаки, нечеткая кластеризация, тренд.

**Постановка проблемы.** Выбор методов преобразования данных в информационной системе в значительной степени определяется сложностью описания составляющих ее компонентов. Для технических управляющих систем принят кибернетический подход описания во временной или частотной области, что связано и с тщательной проработкой данного вопроса в теории автоматического управления [1]. Введение человека в состав автоматизированной управляющей системы существенно меняет характер преобразования данных внутри системы. Для человеко-машинной системы управления важнейшее значение приобретают системы поддержки принятия решений и интерфейсы, призванные согласовать ввод и вывод информации человека и компьютера. Для системы с биологической обратной связью ситуация еще более усугубляется, поскольку выходные сигналы от человека имеют низкие уровни и подвержены воздействию сопутствующих сигналов и шумов. Кроме того, технические системы описываются кибернетическими подходами, основным отличительным свойством которых является повторяемость реакции объекта на стандартные входные воздействия [2]. Это позволяет заменять реальные объекты их формальными моделями, что существенно упрощает проектирование технических систем и анализ функционирования в динамике в различных энергетических режимах. Кибернетический подход применим для описания биологического объекта лишь при условии возможности использования понятий усредненных объектов, напри-

мер, таких как птенцы при инфракрасном обеспечении тепловых искусственных комфортных условий выращивания, когда птицу заменяют математической или физической моделью, а управление интенсивностью облучения осуществляют по реакции обобщенной модели на интенсивность потока [3]. Для описания биологических объектов более адекватным является физиологический подход Анохина, который рассматривает сложную систему в виде взаимосвязанных и взаимообусловленных систем организма, признаковое пространство которых обладает свойствами неопределенности и неоднозначности. Физиологическая система адаптируется к условиям внешней среды перераспределением функций организма как реакции на внешнее воздействие. Неоднозначность реакции биологического объекта является проблемой при создании систем с биологической обратной связью, поскольку описание объектов при кибернетическом и физиологическом подходе существенно разнятся. Применительно к медицинским приложениям кибернетический подход приемлем для больших групп людей, например, для камеры инфракрасной пелоидотерапии при групповом проведении процедур, когда интенсивность инфракрасного облучения эмпирически и по медицинским показателям устанавливается для каждой группы пациентов, отличающихся возрастом, полом, характером заболеваний и т.п. [4]. При переходе к лечению опорно-двигательного аппарата конкретного пациента с его индивидуальными признаками кибернетическая модель системы может

быть принята лишь как обобщенная или базовая, определяющая ограничения и подготовку камеры пелоидотерапии к началу процедуры. Корректировка интенсивности инфракрасного облучения должны определяться конкретной реакцией организма индивидуума на внешнее воздействие.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Взаимодействие человека с техническими системами является важной научно-технической проблемой, поскольку принципы работы технических и физиологических систем существенно разнятся, а необходимость их совместной работы очевидна [5]. Актуальность проблемы подчеркивается широким спектром приложений человеко-машинных систем в области принятия управленческих решений [6], распознавании образов, классификации медицинских и малоконтрастных изображений [7], в интерактивном обучении, что предполагает тесную связь психологии человека с технической обработкой данных [8] и другими областями, где человеческий мозг функционально эффективнее компьютерных систем. Технические системы имеют более высокое быстродействие, способны работать в более сложных условиях эксплуатации, совершают меньше ошибок при выполнении повторяющихся операций, поэтому симбиоз кибернетического и физиологического подходов при построении сложных интеллектуальных систем оправдан. Развитие таких систем захватывает области приложений, в которых человек входит в канал обратной связи управляющей системы, например, обеспечивая управление приводом вооружения по положению головы пилота, что повышает скорость реакции по отслеживанию целей и общую эффективность системы [9].

Выделяют класс задач по созданию технико-биологических систем, в которых управление осуществляется по физиологической реакции организма на внешнее воздействие [10]. Это направление связано с созданием интеллектуальных систем, направленных на подготовку операторов, профессиональных спортсменов, посттравматической и инсультной реабилитации, протезирование конечностей, стимуляцию сердечной мышцы. Для многих методов лечения, например физиотерапевтических, неприемлемы подходы, связанные с вживлением электродов в нервные волокна или мышцы, а также креплением электроэнцефалографической аппаратуры, ограничивающие подвижность пациентов, что приводит к необходимости поиска новых методов съема выходных сигналов у чело-

века [11]. Упрощение средств съема выходных данных усугубляет проблему влияния недостаточности, нечеткости и неоднозначности информации для приема управляющих решений в системах с биологической обратной связью.

**Постановка задания.** Целью работы является разработка информационной технологии обработки первичных выходных данных человека, находящегося в цепи биологической обратной связи, как реакции на воздействие инфракрасного облучения.

Для достижения этой цели необходимо решить задачи:

1) проанализировать методы преобразования выходных сигналов человека применительно к принятию решения по управлению интенсивностью инфракрасного излучения;

2) разработать схему преобразования сигналов, учитывающую нечеткость исходных данных.

Изложение основного материала.

Наиболее приемлемыми признаками при создании технологии преобразования данных с неинвазивных средствами считывания признаков пространства человека являются: теневая температура воздуха внутри камеры пелоидотерапии, радиационная температура поверхности кожного покрова при воздействии инфракрасного облучения, проводимость кожного покрова, частота сердечных сокращений, частота дыхания. В соответствии с санитарными нормами диапазон теневой диапазон температуры составляет 18–24°C, следовательно, без учета радиационной составляющей комфортным уровнем можно признать 22°C. Радиационная температура в соответствии с медицинскими нормами, диапазоном которой является 20–50°C, является аддитивной температурой воздуха в камере и должна быть регулируемой. Электрическое сопротивление кожного покрова человека составляет от 2 МОм при сухой коже до 1 КОм при обильном потоотделении, активный диапазон находится в пределах 40–2 КОм. Частота сердечных сокращений – 40–120 ударов в минуту. Частота дыхания – 16–24 вдохов в минуту, а эффективность охлаждения при 60°C достигается путем выделения до 2,5 литров жидкости в час [12].

Экспериментальные исследования частоты сердечных сокращений, частоты дыхания и сопротивления кожного покрова, проведенные в камере инфракрасной пелоидотерапии, показали существенный разброс показаний при неизменной интенсивности облучения, что свидетельствует о необходимости использования

статистических методов обработки данных. Поскольку обработанные данные должны использоваться для управления интенсивностью инфракрасного облучения, время выборки (объем) данных не должно оказывать существенного влияния на запаздывание управляющего воздействия. Если периоды сердечных сокращений и дыхания известны, то частота измерения сопротивления кожного покрова полностью определяется возможностями современной аппаратуры, например контроллерами ARDUINO, время преобразования которых существенно меньше периода сердечных сокращений.

Если рассмотреть наиболее информативный выходной признак для задачи инфракрасной пелодотерапии – сопротивление кожного покрова, связанного с проницаемостью кожи для пелюиды, то его можно представить как оператор  $R(K)$ , который представлен выборками в моменты времени  $t_0, t_1, \dots, t_m \in T_1$ , где  $K = (k_1, k_2, \dots, k_n)^2$  – вектор, характеризующий состояние объекта. Для использования симметричных фильтров при измеренных значениях в моменты времени  $t_0, t_1, \dots, t_m \in T_1$  необходимо определить значения в моменты времени  $t_{m+1}, t_{m+2}, \dots, t_{m+l} \in T_2$ . Данное допущение корректно при условии, что величина  $R(K)$  определяет значения в моменты  $t_0, t_1, \dots, t_m \in T_1$ , которые действительны и в моменты времени  $t_{m+1}, t_{m+2}, \dots, t_{m+l} \in T_2$ , когда достоверность предсказания высока. На регулярном участке при установившейся интенсивности инфракрасного облучения временной ряд  $R(K)$  можно представить в виде аддитивной модели:

$$R(t) = B(t) + V(t) + N(t) + C(t).$$

Здесь  $B(t)$  – трендовая составляющая последовательности,  $V(t)$  – регулярные вариации вокруг трендовой составляющей,  $N(t)$  – стохастическая составляющая,  $C(t)$  – индивидуальная составляющая восприимчивости объекта. Регулярные вариации вокруг трендовой составляющей вызваны ритмическими биологическими процессами в организме, и основная их частота совпадает с ритмами сердца и дыхания. Трендовая составляющая может быть получена по результатам групповых методов лечения, а стохастическая относится к типовым задачам обработки сигналов. Анализ регулярных вариаций вокруг трендовой составляющей и особенно составляющей индивидуальной восприимчивости представляют собой нетривиальную задачу.

Обработка выходных признаков биологического объекта оказывает непосредственное влияние на принятие управленческих решений, поскольку объект находится в цепи биологи-

ческой обратной связи. Решения принимаются на основе недостаточной и неполной информации при наличии нескольких альтернатив, что может привести к непредсказуемости действий управляющей системы, в отличие от ситуации с детерминированным набором альтернатив. Принятие решения состоит в последовательном анализе проблемы, определении ограничений и формировании критериев принятия решения, генерации альтернатив. При этом достижение одной и той же цели достигается различными способами, а принятые решения могут быть приемлемыми – близкими по эффективности к оптимальным вариантам.

Снижение неопределенности достигается привлечением дополнительной релевантной информации, что, в свою очередь, усложняет проблему согласования разнородной информации, получаемой как реакция на одни воздействия (сопротивление кожного покрова, частота сердечных сокращений, дыхания). При этом возможно рассогласование главной и локальных целей, например, для принятия решения по достижению требуемой интенсивности инфракрасного облучения становится значимой локальная цель, состоящая в минимизации времени принятия управленческого решения. Получаемые решения направлены на будущее управление, что вносит дополнительную неопределенность в начальную неопределенности, обусловленную нечеткостью первичной информации и ее неполнотой.

Рассмотрим функцию принадлежности  $\alpha_A(x)$  нечеткому множеству  $A$  элемента  $x$  из множества  $X$  применительно к задаче принятия решений в следующей интерпретации. Определим функцию принадлежности  $\alpha_A(x)$  как степень близости  $x$  прототипу  $A$  или сходством принадлежности  $A = \{x, \mu_A(x)\}$ . Тогда  $A$  представляет собой множество альтернатив, а  $\alpha_A(x)$  степень предпочтения и пригодность выбора  $x$  как значения переменной  $b$ . В такой трактовке функция принадлежности играет роль отношения упорядочения, связанного с предикатом  $A$  соотношением  $x \geq_A x'$ , которое показывает, что  $x$  больше соответствует другому значению  $x'$  этого же параметра в сложившейся ситуации  $A$ . Продолжив данные рассуждения, можно показать, что неравенство  $\mu_Q(x, x') \geq \mu_Q(x, x'')$  описывает ситуацию, в которой данное выражение означает, что  $x'$  ближе к  $x$ , чем  $x''$ :  $x' \geq_x x''$ . Альтернативы можно представить как нечеткие множества, заданные на нечисловой шкале, тогда нечеткое множество



записується в виде  $B = \{(b, B(b))\}$ , где  $(b, B(b))$  – множества нечетких объектов.

Методы нечеткого вывода описываются несколькими подходами [13]:

1. Цукамото – функции принадлежности несут монотонный характер, и вычисления выходной переменной сводятся к усредненным значениям, полученным по различным правилам;

2. Мамдани – агрегация определяется максимумом, а импликация – минимумом;

3. Сугено – правые части в правилах вывода ограничены линейным случаем:

ЕСЛИ ( $X$  есть  $C_1$ ) И ( $Y$  есть  $D_1$ ), ТО  $Z = c_1X + c_2Y$ ;

ЕСЛИ ( $X$  есть  $C_2$ ) И ( $Y$  есть  $D_2$ ), ТО  $Z = d_1X + d_2Y$ .

Упрощенным подходом является правило нечеткого вывода:

ЕСЛИ ( $X$  есть  $C_i$ ) И ( $Y$  есть  $D_i$ ), ТО  $z = Z_i$ , где  $Z_i$  – четкое решение.

Важным свойством для решаемой задачи принятия управленческих решений является тот факт, что по всем приведенным правилам получается дискретное множество решений, поскольку четко заданы правые части правил. Степень уверенности в решениях заложена в нечеткости исходной информации и функции принадлежности. Если при этом для плохо структурированной проблемы процесс разбить на промежуточные подзадачи, то последовательное решение этих подзадач позволит продвигаться к решению поставленной цели. Такая технология сближает функциональную систему с кибернетической, требует для реализации корректировки подцелей на каждом этапе выполнения и уточнения путей их достижения. При этом переход к каждой последующей подзадаче требует преобразования промежуточной информации, предназначенной для последующего анализа с возможным использованием новых форм ее представления.

Выходные признаки биологического объекта несут вероятностный характер, поэтому эффективный мониторинг первичной информации может быть достигнут методами интеллектуального анализа, такими как классификация и кластеризация.

Качественная классификация позволяет распределить выходное признаковое пространство объекта в соответствии с процедурой лечения, например, с точки зрения способности пропускания активных сред в подкожную область: не пропускает, очень слабо пропускает, пропускает, активно пропускает, в соответствии с которым

активное сопротивление кожного покрова меняется от единиц Мом до единиц КОм. Очевидно, что эти области являются нечеткими и зависят от конкретного пациента. Данный метод относится к классификации с учителем, поскольку по медицинским критериям задаются области, которые отличаются эффективностью лечебной процедуры. Понятно, что они субъективны, области неравномерны и не могут содержать четких разделительных границ.

Кластеризация относится к интеллектуальному анализу данных, который объединяет в группы данные, близкие по определенному признаку. Для медицинских приложений наиболее подходит алгоритм нечеткой кластеризации [14], однако требуется его модификация, связанная с особенностью работы системы управления. Для проведения классификации необходимо выбрать меру подобия по расстоянию между нормированными объектами. Обзор существующих методов показал, что наиболее широко распространенной мерой является Евклидово расстояние  $\rho(x, x') = \sqrt{\sum_i^n (x_i - x'_i)^2}$ , представляющее собой геометрическое расстояние в многомерном пространстве.

В рассматриваемой системе управления с биологической обратной связью присутствуют несколько признаков, имеющих различную природу (сопротивление кожного покрова, частота сердечных сокращений, частота дыхания, радиационная температура кожного покрова). Для их совместной обработки необходима нормализация признакового пространства каждого признака. Значимость каждого признака разная, например, сопротивление кожного покрова для инфракрасной пелоидотерапии является определяющим признаком, поскольку проводимость кожи непосредственно влияют на эффективность проведения процедуры пелоидотерапии. Количество кластеров, которое можно получить из множества, не может превышать числа элементов в множестве, но при введении ограничения по расстоянию число кластеров сокращается, а применительно к сопротивлению кожного покрова данный кластер является наиболее значимым, или мощным кластером. Экспериментальные исследования подтвердили информативность данного признака, однако показали также существенную инерционность сигнала, что оказывает значимое влияние на процесс управления. Следовательно, необходимы иные признаки, которые могут быть менее информативны относительно медицинских показаний эффективности пелоидотерапии, однако обладающие существенно более высокими

динамическими характеристиками. Основным преимуществом кластеризации является отсутствие ограничений на распределение, универсальность метода, отсутствие необходимости в априорной информации относительно классификации, что важно при работе с разнородными признаками.

Кластеризация в рассматриваемом аспекте имеет особенность, состоящую в недоступности дополнительной информации на начальный момент анализа, приводящую к неопределенности в принятии решения.

В общем виде задача кластеризации реализуется следующим образом. Элемент выходных признаков  $g$ , представляет собой элемент  $m$ -мерного пространства  $g = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ , где  $x_i$  – атрибут объекта  $g$  [13]. Массив входных объектов  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$  представляется матрицей атрибутов  $X$  размерностью  $n \times m$ :

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix}.$$

Подмножество близких по определенным характеристикам объектов из  $X$  составляют кластер, а мерой близости является расстояние между объектами  $g_i$  и  $g_j$ . Алгоритм кластеризации включает 4 этапа:

- выделение значимых количественных характеристик нормированных объектов в виде векторов;
- принятие метрики для селекции характеристик объектов, в качестве которой чаще всего используется метрика Евклида;
- разбиение объектов на группы, проверка стабильности кластеризации и сравнение кластеров, полученных различными методами;
- определение центров кластеров, существенно упрощающих принятие управляющих решений.

Схема нечеткой кластеризации включает:

1. Задание первоначального нечеткого разбиения  $n$  объектов на  $k$  кластеров с указанием матрицы принадлежности  $U$  размерностью  $n \times k$ , значения элементов  $u_{ij}$  которой находятся в пределах  $[0,1]$ .
2. Вычисление критерия нечеткой ошибки с использованием элементов функции принадлежности матрицы  $U$ :

$$E^2(X, U) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k u_{ij} \|x_i - c_j\|^2,$$

где  $c_j = \sum_{i=1}^n u_{ij} x_i$  – центральная часть нечеткого кластера  $kl_j$ .

3. Перегруппировка объектов исходного множества для уменьшения величины критерия нечеткой ошибки.

4. Определение критерия нечеткой ошибки до достижения требуемого рассогласования.

При анализе кластеров предполагаем, что они имеют центр, т.е. особую внутреннюю точку, которая характеризует анализируемое множество признаков. Поскольку форма кластера может быть произвольной, то и центр кластера может располагаться в произвольной точке, поэтому необходим подход, который учитывает и это обстоятельство. Для формализованной задачи, удовлетворяющей принципы кибернетической системы, решение связано с нахождением приемлемого значения оценочной функции. Учитывая слабую структурированность исходной информации, разбиение на кластеры с нечеткой функцией принадлежности и очевидным образом решения, принятые на основании полученных данных о центрах кластеров, может быть принято как промежуточное или локальное.

Если выделить в текущем окне составляющие массива с устойчивой составляющей, для которых расстояние между объектами мало, можно по центрам текущих кластеров определить тренд процесса. Аппроксимировав выборочные значения центров кластеров полиномом первого порядка, можно определить наклон прямой, т.е. направление и скорость протекания процесса. Данная процедура может быть использована в квазистационарном режиме работы камеры пелоидотерапии, когда происходит колебание процесса в установившемся режиме, который является основным процедурным.

Если возникает внешнее скачкообразное возбуждение, например, за счет запаздывания реакции контролируемых систем организма, происходит адаптация биологического объекта для сохранения гомеостаза. При этом перестраивается внутренняя и периферическая системы кровоснабжения, что находит свое отражение в кратковременном изменении частоты сердечных сокращений и при тепловой перегрузке частоты дыхания. Информативным признаком для управления интенсивностью инфракрасного облучения может служить скачок дисперсии показаний частоты сердечных сокращений и дыхания. Дисперсию можно определить по известной зависимости:

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{b=1}^N (x_k^b - \bar{x}_k)^2,$$

где  $N$  – общее число выборок,  $x_k^b$  –  $b$ -е значение  $k$ -й переменной из области определения,  $\bar{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{b=1}^N x_k^b$ .

Дисперсия позволяет получить информацию относительно изменений выходного признакового пространства биологического объекта как

ответ на внешнее возмущение. Данный признак служит дополнительным относительно главного признака и способствует повышению динамических характеристик системы.

На рисунке 1 представлена упрощенная схема управления инфракрасной системой пелоидотерапии с биологической обратной связью.

Выходные признаки биологического объекта нормализуются для возможности сопоставления разнородных физических величин. Выделяется скользящее окно каждого признака, из которого выделяется главный информационный кластер, и определяются дисперсии всего признакового пространства, по которым отслеживаются динамика реагирования организма на возмущения. Определение текущих центров главного кластера в скользящем окне позволяет построить тренд развития процесса, по значениям которого и дисперсиям принимается локальное решение относительно изменения интенсивности инфракрасного излучения на один или несколько уровней. Последовательное приближение состоит в увеличении или уменьшении значения содержимого памяти на единицу в зависимости от принятого решения. Содержимое памяти является управляющим для силовых симисторных широтно-импульсных преобразователей инфракрасных излучателей камеры пелоидотерапии.

Следовательно, биологический объект находится в цепи обратной связи, которая по реакции человека автоматически меняет интенсивность инфракрасного облучения так, чтобы интенсивность соответствовала активной проводимости кожного покрова. Реализация компонентов и программных средств реализована на базе технологии ARDUINO.

**Выводы.**

1. Предложен путь снижения влияния неопределенности выходных признаков биологического



**Рис. 1. Схема управления с биологической обратной связью**

объекта на принятие управленческого решения разделением пространства на текущие центры главного кластера дисперсии вспомогательных признаков.

2. Разработана схема управления инфракрасной камерой пелоидотерапии с биологической обратной связью, обеспечивающая автоматическое формирование и поддержание интенсивности облучения, соответствующего оптимизации лечебного процесса конкретного пациента.

**Список литературы:**

1. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Москва : ЮРАЙТ. 2015. 276 с.
2. Сороко С.И., Трубачев В.В. Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления. Санкт-Петербург : ИЭФБ РАН. 2010. 607 с.
3. Дубровин А.В. Автоматизированная электротехнология централизованного локального и общего обогрева в птицеводстве : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва. 2004. 446 с.
4. Деклараційний патент № 58051А (Україна). Спосіб пелоїдотерапії та камера для його здійснення / Косоверов Є.О. та ін.
5. Акулов С.А., Федотов А.А. Основы теории биотехнических систем. Москва : ФИЗМАТЛИТ. 2014. 259 с.
6. Плоткин Ф.Б. Компьютерное биоуправление: прогрессивные технологии – в практику здравоохранения. Минск : Новые технологии в медицине. 2012. С. 106–110.
7. Moore J. Biomedical technology and devices. Handbook. CRC Press LLC. 2004. 750 p.

8. Hallman D.M., Olsson E.M., Hallman D.M., Von Scheele D. Effects of heart rate variability biofeedback in subjects with stress – related chronic neck pain: a pilot study. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*. 2011. Vol. 36. № 2. P. 71–80.
9. Пятакович Ф.А., Сурушкин М.А. Мультипараметрическая одноканальная система управления в игровом модуле “Хотх” с биологической обратной связью. *Фундаментальные исследования*. 2011. № 4. С. 139–144.
10. Мосолов С.Н., Бирюкова Е.В., Тимофеев И.В. Применение А-Θ-Тренинга биологической обратной связи при тревожных расстройствах, резидентных к психофармакотерапии (открытое рандомизированное контролируемое исследование). *Обозрение психиатрии и медицинской психологии им. В.М. Бехтерева*. 2010. № 1. С. 15–20.
11. Wheat A.L., Larkin K.T. Biofeedback of heart rate variability and related physiology: a critical review. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*. 2010. Vol. 35. № 3. P. 229–242.
12. Зайчик А.Ш., Чурилов Л.П. Патологическая физиология. Том 2. Санкт-Петербург : ЭЛБИ–СПб. 2007. 768 с.
13. Шуметов В.Г., Шуметова Л.В. Кластерный анализ: подход к применению ЭВМ. Орел : ОрелГТУ. 2010. 118 с.
14. Филатова Н.Н., Ханеев Д.М. Пирамидальная сеть для классификации объектов, представленных нечеткими признаками. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2012. № 9(134). С. 45–49.

### **НЕЧІТКИЙ КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ З БІОЛОГІЧНИМ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ**

*Розглянуто перетворення ознакового простору даних біологічного об'єкта, що знаходиться в каналі зворотного зв'язку управляючої системи. Запропоновано розділ ознакового простору на головне та допоміжне, що містить інформацію про динаміку перебудови систем організму. Розглянуто формування тренду розвитку процесу по центрам головного кластеру, що забезпечило можливість виділення первинних ознак для прийняття рішення з управління напрямом зміни впливу на біологічний об'єкт.*

**Ключові слова:** інфрачервона система, біологічний зворотній зв'язок, значимі ознаки, нечітка класифікація, тренд.

### **FUZZY CLUSTER ANALYSIS IN THE CONTROL SYSTEM WITH BIOLOGICAL FEEDBACK**

*The transformation of the attribute data space of a biological object in the feedback channel of the control system is considered. A division of the attribute space into the main and auxiliary, containing information about the dynamics of the restructuring of the body systems, is proposed. The formation of the development trend of the process along the centers of the main cluster was considered, which provided the possibility of identifying the primary features for making a decision on managing the direction of change in the impact on a biological object.*

**Key words:** infrared system, biofeedback, significant features, fuzzy clustering, trend.

**Митрофанов О.В.**

Криворізький національний університет

## АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ГАЗОТЕПЛОНОСІЙНИМИ ПОТОКАМИ НА КОНВЕЄРНІЙ ВИПАЛЮВАЛЬНІЙ МАШИНИ

*Створено автоматизовану систему управління димососами конвеєрної випалювальної машини, що використовує температури відпрацьованих газотеплоносійних потоків у технологічних зонах випалу і рекуперації. Ці потоки направляються, відповідно, до зон сушіння і попереднього нагрівання. Представлені результати комп'ютерного моделювання для визначення впливу газотеплоносійних потоків на термічний процес виготовлення залізорудних обкотишів у технологічних зонах машини.*

**Ключові слова:** конвеєрна випалювальна машина, обкотиші, технологічна зона, термічний процес, газотеплоносійний потік.

**Постановка проблеми.** Термічний процес виготовлення обкотишів відбувається на конвеєрних випалювальних машинах (КВМ) із продуктивністю від 90 – 110 т/ч для ОК – 108 до 360 т/ч для ОК – 520/536. У процесі виготовлення обкотиші проходять технологічні зони: сушіння, підігрівання, випалювання, рекуперації та охолодження. У кожній технологічній зоні підтримується певний температурний і газотеплоносійний режим. Основна мета виготовлення обкотишів полягає в їх отриманні з оптимальними металургійними властивостями: максимальне видалення сірки і надання їм міцності, що забезпечує їх транспортування, перевантаження і плавку в доменних печах.

КВМ має тракт для транспортування потоків газо-теплоносіїв, який з'єднує технологічні зони КВМ із повітродувними машинами (димососами) – витяжними і дуттьовими. Атмосферне повітря просмоктується знизу вгору через розташовані на випалювальних візках обкотиші в процесі їх охолодження. Просмоктування в технологічних зонах випалу і рекуперації здійснюється шляхом створення розрідження у вакуум-камерах за допомогою витяжних димососів. У тому випадку, коли для охолодження обкотишів атмосферне повітря подають знизу вгору через дуттьові камери, використовують дуттьові повітродувні машини.

Нарешті, при вторинному використанні потоки газо-теплоносіїв відсмоктуються з камер і подаються до випалювальних візків знизу через дуттьові камери або зверху – через горн. Це здійснюють повітродувні машини, що виконують функції витяжних і дуттьових.

Повітродувні машини, застосовувані для всіх зазначених цілей, за конструкцією практично однакові і є відцентровими машинами з двосто-

роннім всмоктуванням. Різниця їх полягає в тому, що одні з них – вентилятори – призначені для роботи на чистому повітрі (газі) з температурою навколишнього середовища, а інші – димососи і ексгаустери (або, в термінології заводу-випалювача, нагнітачі) – пристосовані для роботи на забрудненому гарячому газоповітряному потоку.

Досвід експлуатації існуючих фізично застарілих КВМ переконливо показує, що дотримання газодинамічних характеристик на КВМ під час виготовлення обкотишів не в повній мірі контролюється в зонах КВМ. Тому управляти термічним процесом виготовлення обкотишів з урахуванням газотеплоносійних потоків приходиться на основі непрямого визначення температур у кожній технологічній зоні КВМ [1]. У цьому напрямку фахівцями проводиться дослідження, в результаті яких з'явилися нові розробки. Це вказує на необхідність проведення додаткові дослідження для уточнення розподілу параметрів потоку газо-теплоносіїв у зонах КВМ і становити методи керування цими потоками. Такий підхід свідчить також про те, що тематика досліджень, присвячених процесу термічного процесу виготовлення обкотишів із раціональним управлінням із розподілу газотеплоносійних потоків упродовж усіх зон КВМ, є актуальною науковою та практичною задачею.

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

Автоматизації виробництва залізорудних обкотишів на КВМ присвячена велика кількість видань [2–5]. У цих роботах значну увагу приділено автоматизованим системам керування термічних процесів під час виготовлення залізорудних обкотишів у лабораторних і промислових умовах. Проте термічні процеси не розглядаються з урахуванням впливів потоків газотеплоносіїв, і їх регулювання не забезпечується впродовж технологічних зон

КВМ. У наукових роботах [6–9] відмічається, що така технологія містять шихтові матеріали, які надають ряд труднощів і особливостей при автоматизації цих процесів. До них відносяться значні енерговитрати, оскільки нераціонально використовуються потоки газо-теплоносіїв. При переміщенні випалювальних візків упродовж технологічних зон КВМ відсутня можливість контролю параметрів технологічного процесу в реальному часі. Усе це приводить до неякісного виготовлення обкотишів. У той же час дослідники не домагаються вирішити інтенсифікацію теплообміну в шарі обкотишів за рахунок управління швидкістю руху високотемпературних потоків газо-теплоносіїв, параметри яких залежать від висоти шару і потужності димососів [10; 11].

У деяких наукових роботах надано рекомендації щодо використання оптимальних режимів термічного процесу в окремих технологічних зонах, при яких дозволяють отримувати залізорудні обкотиші з високими металургійними властивостями. Для цього дослідники пропонують ідею використання в автоматизованих системах управління нечіткого контролера для поліпшення процесу термічної обробки залізорудних обкотишів [12] або використовують математичне моделювання, яке знаходить широке застосування при аналізі та вдосконаленні процесів виготовлення залізорудних обкотишів на КВМ [13–17]. У моделях враховуються: швидкість руху стрічки, висота шару, витрати газу, швидкість продуву, вологість, середній діаметр обкотишів, основність та склад заліза в обкотишах. Як вказують автори, це дає збільшення продуктивності КВМ на 2,5%. Проте виникають проблеми з виміром у реальному часі в потоці таких технологічних параметрів, наприклад, як температура всередині та на поверхні шару обкотишів на випалювальних візках. При цьому невирішені питання розподілу потоків газо-теплоносіїв по зонах КВМ. Моделі не враховують вплив параметрів потоку газо-теплоносія, що відходить із зон випалу і рекуперації та впливає на зони сушіння та попереднього нагрівання, тобто на процес попередньої обробки сирих обкотишів. Результат протікання такого технологічного процесу приводить до отримання неякісних обкотишів і надмірного використання природного газу.

**Постановка завдання.** Завданням дослідження є раціональне використання за рахунок перерозподілу потоків газо-теплоносіїв упродовж усіх зон КВМ за допомогою автоматизованої системи управління димососами. Завданням цієї системи є забезпечити ефективний термічний процес

виготовлення обкотишів. Для цього потоки регулюються і направляються з технологічних зон випалювання і рекуперації в зони сушки і попереднього нагрівання обкотишів. При цьому одночасно забезпечується рівномірність випалювання обкотишів за висотою шару в технологічній зоні їх випалювання за рахунок керування процесом подачі атмосферного повітря в зону випалювання через зону охолодження.

Для реалізації поставленої мети поставлено такі задачі:

- розробити структурну схему управління димососами для керування термічним процесом виготовлення залізорудних обкотишів на КВМ;
- визначити розподіл температур потоків газо-теплоносіїв по технологічним зонам КВМ при управлінні димососами у функції температури потоків газо-теплоносіїв, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Для автоматичного керування розподілом потоків газо-теплоносіїв по технологічним зонам КВМ у функції зміни температур потоків газо-теплоносіїв, що відходить із зон випалювання і рекуперації, розроблено автоматизовану систему управління (АСУ) димососами. Структурна теплотехнічна схема КВМ і АСУ надана на рис. 1. На схемі позначені технологічні зони: 1 – сушіння 1, 2 – сушіння 2, 3 – попереднього нагрівання, 4 – випалювання, 5 – рекуперації, 6 – зона охолодження 1 і 7 – охолодження 2. Схема складається з таких структурних елементів: Д1, ... Д5 – димососи, ГО – установка газоочищення, БУ1, ... БУ3 – блоки управління, ДТ1 і ДТ2 – датчики температури, Д<sub>вшо</sub> – датчик висоти шару обкотишів, Д<sub>швв</sub> – датчик швидкості переміщення випалювальних візків.

АСУ працює за певним алгоритмом. На вхід контролера задаються потрібні діапазони температур для технологічних зон КВМ, висота шару на випалювальних візках, швидкість їх переміщення тощо. Контролер керує через блоки управління БУ2 і БУ3 роботою димососів Д4 і Д6, забезпечуючи подачу газотеплоносійного потоку, відповідно, в зони сушіння 1 і попереднього підігрівання 2. Контролюють температуру газотеплоносійного потоку, що надходить із зон випалювання 4 і рекуперації 5 КМ. Відповідно до їх значення за допомогою димососів Д4 і Д6 регулюють тиск газотеплоносійних потоків, який по трубопроводах нагнітається в зони сушіння і попереднього нагрівання. При цьому контролер враховує задані значення температурного режиму в техно-

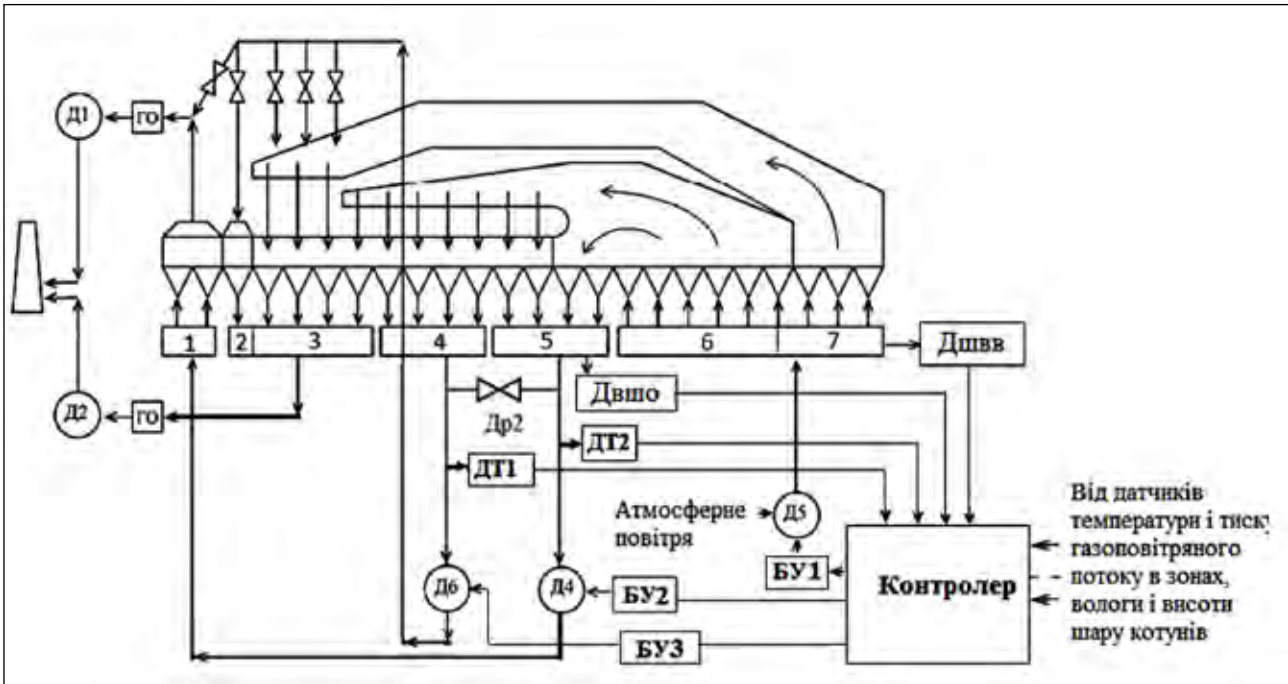


Рис. 1. Структурна схема АСУ димососами

логічних зонах КВМ, висоту шару обкотишів на випалювальних візках, що визначається датчиком  $D_{\text{вшо}}$ , і швидкість переміщення випалювальних візків упродовж зон КМ, що контролюється датчиком  $D_{\text{швв}}$ . Таким чином забезпечується регулювання газотеплоносійного потоку між зонами сушіння 1 і попереднього нагрівання 2, підтримується заданий температурний режим у цих зонах. Контролюючи датчиками ДТ1 і ДТ2 температури газотеплоносійних потоків, що надходить із зон випалювання 4 і рекуперації 5, одночасно керують подачею атмосферного повітря в зону випалювання 4 через зону охолодження 7, регулюючи тиск атмосферного повітря димососом Д5. Це дає можливість отримувати рівномірність спікання обкотишів у зоні випалювання 5 за висотою шару обкотишів.

Для визначення розподілу параметрів газотеплоносійних потоків КВМ при керуванні димососами у функції температури газотеплоносійних потоків, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації, представлено графіками на рис. 1 і рис. 2. Дослідження параметрів газотеплоносійних потоків на виходах із зон випалювання і рекуперації та вплив їх на інші технологічні зони КВМ виконано комп'ютерним моделюванням, використовуючи методику і математичні вирази, які представлено в роботі [18].

Побудовано залежності розподілу температур газотеплоносійного потоку на виході із зон випалювання і рекуперації КВМ з урахуванням: тем-

ператури цього потоку, висоти шару обкотишів на конвеєрних візках, різниці тиску газотеплоносійного потоку до входу в шар обкотишів і після нього. Графіки розподілу в часі температур газотеплоносійних потоків КВМ при керуванні димососом 6 у функції температури газотеплоносійних потоків, що відходять із технологічної зони випалювання, представлено на графіках рис. 1. Графік 1 на цьому рисунку представляє зміну в часі температури газотеплоносійного потоку на виході з технологічної зони випалювання, а графік 2 – тиск цього потоку над шаром обкотишів у технологічній зоні сушки 2, який забезпечується димососом Д6. Температури газотеплоносійних потоків у технологічній зоні сушіння 2 без регулювання і регулюванням тиску димососом 6 представлено відповідними графіками 3 і 4. Зміна у часі температури в технологічній зоні попереднього підігрівання представлено графіком 5.

Графік 1 на рис. 2 представляє розподіл у часі температури газотеплоносійного потоку на виході із технологічної зони рекуперації, а графік 2 – тиск цього потоку над шаром обкотишів у технологічній зоні сушки 1, який забезпечується димососом Д4. Інші графіки 3 і 4 на цьому рисунку представляють зміну температури газотеплоносійних потоків у горні зони сушки 1, відповідно, при керуванні димососом Д4 і отриманих без регулювання. Графік 5 отриманий шляхом проведення експерименту і при керуванні димососом Д4.

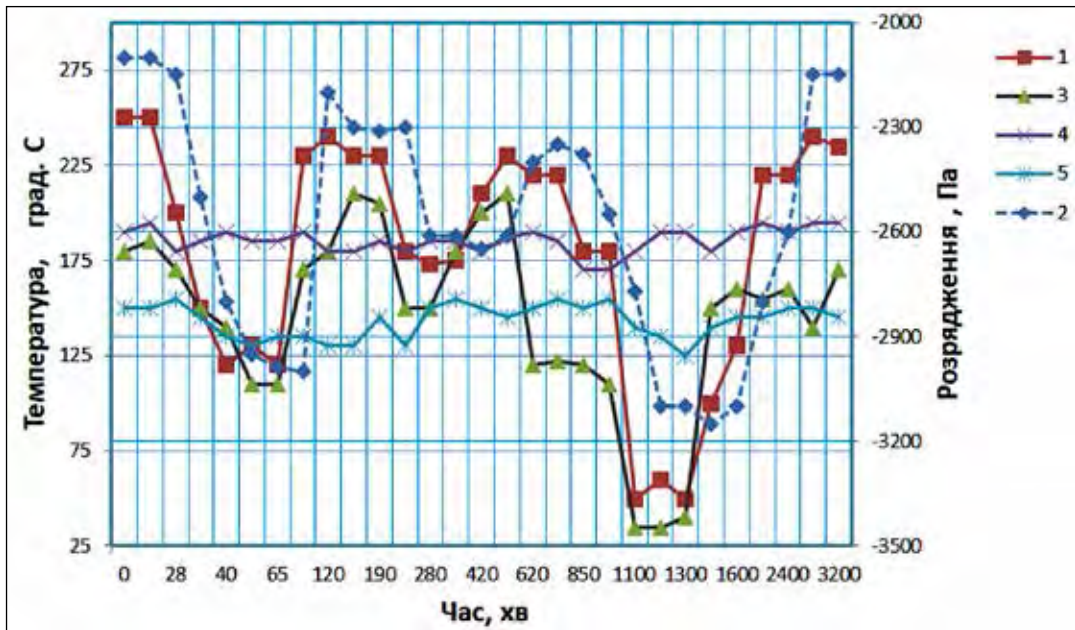


Рис. 2. Графіки розподілу в часі температур і тиску газотеплоносійних потоків КВМ при керуванні димососом Д6 у функції температури газотеплоносійних потоків, що відходять із технологічної зони випалювання

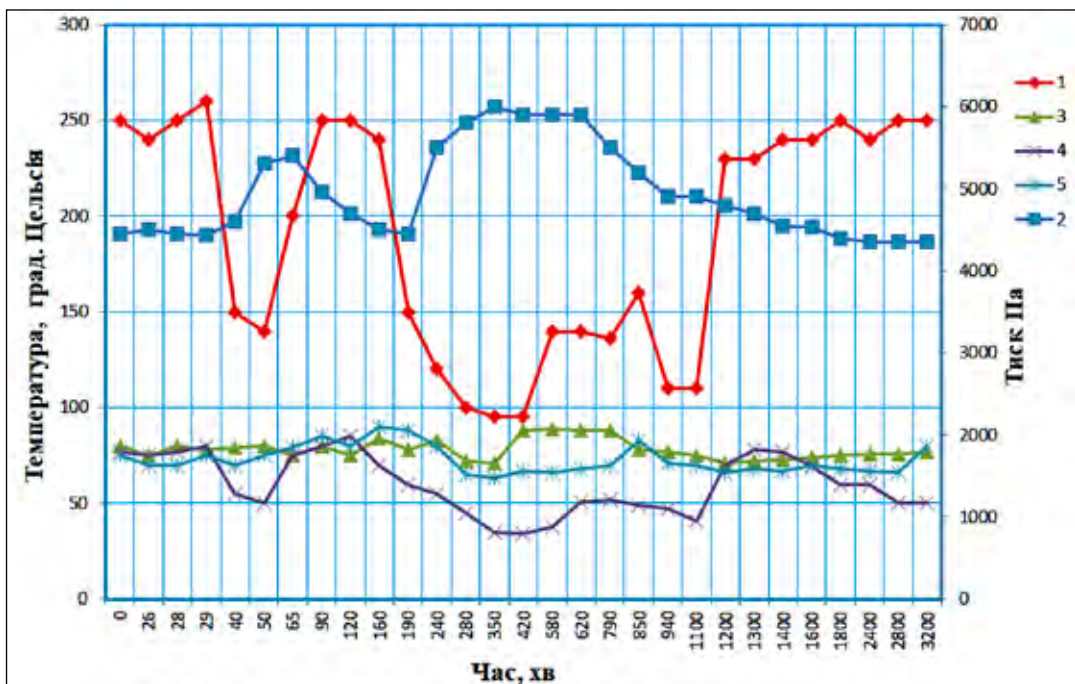


Рис. 3. Графіки розподілу в часі температур і тиску газотеплоносійних потоків КВМ при керуванні димососом Д4 у функції температури газотеплоносійних потоків, що відходять із технологічної зони рекуперації

Як видно з графіків, що надані на рис. 1 і рис. 2, температура газотеплоносійних потоків на виходах із технологічної зони випалювання КВМ змінюється від 250°C до 50°C, а із зони рекуперації – від 250°C до 95°C. При цьому швидкість переміщення випалювальних візків дорівнювала величині 0,049 м/с, а постійна температура газо-

теплоносійного потоку, що подається із технологічної зони охолодження в зони випалювання і рекуперації, складала 440°C.

Результати комп'ютерного моделювання показують, що під час зміни температури газотеплоносійних потоків на виходах технологічних зон випалювання і рекуперації за допомогою димососів



Д4 і Д6 змінюється тиск у зонах сушіння і попереднього нагрівання. Це дозволяє більш інтенсивно продувати шар обкотишів у цих зонах.

Сушка обкотишів виробляється комбінованим способом: у першій частині зони газотеплоносій, що подається димососом Д4 із ковпака зони охолодження, продувається через шар обкотишів знизу вгору з температурою від 83°C до 63°C, у другій частині газотеплоносій з температурою від 170°C до 140°C прокачується через шар зверху вниз. У технологічній зоні підігрівання відбувається окислення магнетиту в гематит. Для цього в даній зоні підтримується температурний режим, який становить 700-1100 ° С. На третій стадії обкотиші надходять у технологічну зону випалювання, температурний режим в якій встановлюється в межах 1250-1350° С. Випал обкотишів у цій зоні є однією з найважливіших і складніших стадій із виробництва обкотишів. Тут триває процес окислення обкотишів нижніх шарів, йдуть процеси десульфурації і зміцнення. В якості палива на КВМ застосовується природний газ з теплотворною здатністю до 8000 ккал/Н м<sup>3</sup>, а наявність вапняку в складі обкотишів призводить до їх спікання вже при температурі 1300°C. Температурний режим у технологічній зоні випалювання підтримується регулюванням додачі природного газу в співвідношенні з подачею атмосферного повітря, стабілізуючи тут потік.

Наступною є зона рекуперація, максимальна температура в газоповітряній камері становить 500-550°C. У зоні рекуперації магнетит остаточно окислюється, і сірка вигорає в нижніх горизонтах шару. У зоні охолодження обкотиші охолоджуються до температури нижче 150 ° С для більшості працюючих КВМ. Це досягається подачею атмосферного повітря при керуванні димососом Д5.

#### Висновки.

1. Розроблена структурна схема автоматизованого управління димососами, яка забезпечує перерозподіл газотеплоносійних потоків упродовж усіх зон КВМ. Такі потоки направляються з технологічних зон випалювання і рекуперації, відповідно, в зони сушіння і попереднього нагрівання обкотишів. Схема має такі елементи: димососи, роботою яких управляє мікропроцесор із блоками управління, використовуючи інформацію датчиків: температури, висоти шару обкотишів, швидкості переміщення випалювальних візків.

2. Визначено розподіл температури газотеплоносійних потоків по технологічним зонам КВМ при управлінні димососами у функції температури газотеплоносійних потоків, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації. Як показали дослідження, АСУ при зниженні температур газотеплоносійних потоків на виході із цих зон управляють димососами, збільшуючи тиск цих потоків у зонах сушки і попереднього нагріву,

#### Список літератури:

1. Кривоносов В.А. Контроль температуры окатышей по зонам обжиговой машины. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011. № 8. С. 189–194.
2. Буткарев А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах. *Сталь*. 2011. № 5. С. 4–8.
3. Ксендзовский В.Р. Автоматизация процессов производства окатышей. *Металлургия*, 1971. 216 с.
4. Кривоносов В.А. Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины. *Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона»*. 2013. № 3.
5. Pomerleau D. Optimization of a simulated iron-oxide pellets induration furnace. *11th Mediterranean Conference on Control and Automation*. 2003. Т7 – 047.
6. Юрьев Б.П. Основы теории процессов при обжиге железорудных окатышей : научная монография / М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. 310 с.
7. Марков А.В. Применение UML-диаграмм и сетей Петри для проектирования ПО технологического процесса обжига окатышей. *Сб. науч. тр. НГТУ*. 2014. № 3(77). С. 99–118.
8. Мных А.С. К вопросу синтеза тепловой модели термообработки железорудных окатышей. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. № 7. С. 14–20.
9. Kopot N.N. Comparison of Heating Systems in Conveyer Roasting Machines. *Stal*. 2010. № 3. P. 8–13.
10. Lobov V. Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. № 4. P. 34–38.
11. Мных А.С. Исследование сегрегации гранул по высоте слоя обеспечивающей исключение неравномерной тепловой обработки окатышей. *Збірник наукових праць ДДТУ*. 2015. № 2(27). С. 148–153.
12. Лобов В.Й. Нечітке управління режимом термічної обробки залізорудних обкотишів на конвеєрній машині. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2017. № 34. С. 182–191.

13. Майзель Г.М. Опыт разработки и промышленного применения математических моделей для управления процессом производства окатышей на конвейерной машине. *Горная Промышленность*. № 5. 2000. С. 45–47.

14. Боковиков Б.А., Брагин В.В., Малкин В.М. и др. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата. *Сталь*. 2010. № 9. С. 84–87.

15. Спириин Н.А. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП. Екатеринбург : ООО «УИПЦ», 2014. 558 с.

16. Пирматов Д.С. Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине. *Сборник трудов всероссийской конференции: Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ*. Воронеж. 2010. С. 88–89.

17. Lobov V.I. Temperature distribution model of the iron ore pellets layer inside the combustion chamber of the belt kiln burning zone. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015. № 2. P. 109–117.

18. Кривоносов В.А. Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2010. № 5. С. 128–132.

### **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОВОЗДУШНЫМИ ПОТОКАМИ НА КОНВЕЙЕРНОЙ ОБЖИГОВОЙ МАШИНЕ**

*Создана автоматизированная система управления дымососами конвейерной обжиговой машины по температурам газоздушных потоков из технологических зон обжига и рекуперации. Эти потоки направляются, соответственно, в зоны сушки и предварительного нагрева. Представлены результаты компьютерного моделирования для определения влияния температур газоздушных потоков на термический процесс изготовления железорудных окатышей в технологических зонах машины.*

**Ключевые слова:** конвейерная обжиговая машина, технологические зоны, термический процесс, газоздушный поток.

### **AUTOMATED CONTROL OF GAS AIR FLOWS ON A CONVEYOR BURNING MACHINE**

*An automated control system has been created for the conveyor-burning machine's smoke exhausters in terms of the gas-air flow temperatures from the burning and recovery process zones. These flows are directed to the drying and preheating zones, respectively. The results of computer simulation for determining the effect of gas-air flow temperatures on the thermal process of manufacturing iron ore pellets in the process zones of the machine are presented.*

**Key words:** conveyor roasting machine, technological zones, thermal process, gas-air flow.

*Недашківський Є.А.*

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

## ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРОГНОЗУВАННЯ ТИМЧАСОВИХ РЯДІВ З ФРАКТАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ НА ОСНОВІ ЛІНГВІСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

*У роботі розглянуті та розроблені теоретико-методологічні аспекти прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями на основі лінгвістичного моделювання. Проведений аналіз прогнозування фінансового часового ряду на основі лінгвістичного моделювання, який передбачає масштабування часового ряду та виділення корозмірності, показав, що необхідно здійснювати укрупнення економічних показників шляхом їх об'єднання в групу. Формування симетрії масштабування фінансового часового ряду виробляється з метою отримання числових показників перетворень, а також оцінки ступеня порушення симетрії. Особливості запропонованих теоретико-методологічних аспектів прогнозування дозволяють аналізувати та прогнозувати фінансові часові ряди в умовах, коли методи, які використовують окремо апарат математичної статистики або інформаційних технологій, виявляються малоефективними. На основі описаних методів аналізу та прогнозування будуються загальні теоретико-методологічні аспекти, що направлені на формування програмного додатку.*

**Ключові слова:** прогнозування, фінансові часові ряди, лінгвістичне моделювання, фрактальні властивості, інформаційні технології.

**Постановка проблеми.** Структуризація та формалізація математичних моделей, їх популярність та всебічне застосування призвело до того, що сьогодні не тільки точні фундаментальні науки базуються на концепціях математичних моделей, а й природні та абстрактні науки спираються на механізми теорії динамічних систем. Здійснюється аналіз складних систем, що своєю чергою спонукає до породження часових рядів. При цьому необхідно зауважити, що завжди присутній принцип ієрархічності, який підштовхує до пошуку нової парадигми, в тому числі і на основі нелінійної динаміки. Завдання прогнозування поведінки складних динамічних систем, особливо в економіці і соціальній сфері є таким, що важко формалізується. Сутність прогнозування ґрунтується на виявленні прихованих закономірностей в накопичених даних [1].

В економічній теорії проблема аналізу накопичених даних криється в складності опису ринкових систем, заснованих на фінансових показниках, які часто розглядаються як випадкові величини. Саме з огляду на це більшість підходів до аналізу та прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями засновано на статистичних методах і моделях. Однак, не дивлячись на актуальність і масштабність даного підходу, він не є досить точним в силу відсутності розуміння природи мінливості ринків капіталу і механізму передбачення

коливання цін. Здебільшого результат виникнення зовнішніх факторів здійснює вплив на динаміку часових рядів з фрактальними властивостями, а саме відбувається порушення структури, а попередні дані залишаються незмінними. Це є особливістю практично будь-якого фінансового часового ряду. Тому в умовах сучасної ринкової економіки актуальним питанням є розробка теоретико-методологічних аспектів прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями на основі лінгвістичного моделювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В рамках нинішньої теорії економічних систем багато вчених пропонують спиратися на теорію динамічних систем [2] або теорію хаосу [3; 4]. Даний підхід порівняно молодий, проте спираючись на дослідження [5, 6], можна стверджувати про злиття методів нелінійної динаміки з існуючими економічними дослідженнями, що в комплексі призведе до створення нових моделей ринків капіталу.

Аналіз часових рядів [7, 8] в умовах нинішньої економічної науки належить до розділу математичної фізики, який активно розвивається і поглинає як методи теорії динамічних систем, так і методи фрактального аналізу [9]. Як окрема структурна одиниця даний механізм аналізу активно застосовується в економіці для аналізу інформації у вигляді часових рядів котирувань

акцій компаній. Алгоритм підходу базується на нестабільності ринку цінних паперів, що призводить до значних коливань і надалі до виникнення хаотичних динамічних систем. Хаос в динамічних системах – це ніщо інше, як експонентний розкид близьких траєкторій для класу хаотичних атракторів. Рівень експоненціального розкиду характеризується старшим показником Ляпунова, а рівень «безладу» – ентропією. Наслідок знаходження будь-якої з цих величин є значенням горизонту прогнозу для аналізованого часового ряду. Так само знаходження розмірності вкладення, тобто мінімальне число динамічних змінних, які однозначно описують спостережуваний процес, можна знайти, використовуючи фундаментальні аспекти теорії динамічних систем.

Сьогодні формування та побудова моделей, спрямованих на відображення динаміки фінансових часових рядів [10], є однією з головних проблем при аналізі та прогнозуванні часових рядів з фрактальними властивостями. Оскільки зовнішні фактори здійснюють вплив на динаміку часових рядів з фрактальними властивостями з порушенням структури і незмінністю попередніх даних в силу присутності нелінійності використання методів типу MACD або ARIMA стає неефективним та викликає систематичні помилки у прогнозі.

Проблемам автоматизації системи аналізу та прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями присвячено роботи як вітчизняних, так і зарубіжних учених [10–21]. Проведений аналіз сучасних наукових робіт у галузі автоматизації процесів аналізу та прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями, розробки спеціалізованих програмних додатків інформаційної підтримки процесів аналізу та прогнозування фінансових часових рядів показує, що на цей час основні напрями дослідження науковців спрямовані на розробку комплексних інтеграційних рішень, які могли б враховувати вплив людського фактору на всіх етапах життєвого циклу виробу. Однак варто зазначити, що досліджені розробки та досягнення не враховують існуючий і дуже важливий взаємозв'язок між аналізом часових рядів та їх подальшим прогнозуванням з урахуванням фрактальних особливостей. Тому існує нагальна потреба в подальшому дослідженні методів, принципів та механізмів реалізації, формалізації та алгоритмізації процесу аналізу та прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями в системі управління інформаційними технологіями економічного спектру.

Постановка завдання. У даній статті необхідно розглянути та розробити теоретико-методологічні аспекти прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями на основі лінгвістичного моделювання.

**Виклад основного матеріалу.** Більшість моделей описує поведінку фінансових процесів за допомогою нечітких моделей. Методи прогнозування на основі моделей нечітких часових рядів дозволяють здійснити найбільш адекватну оцінку майбутніх змін в соціально-економічних системах.

Припустимо, що є часовий ряд  $(x_t, y_t)$ , реляційна модель якого окреслюється у вигляді відношення:

$$Y = T, X,$$

де  $X$  – домен, що зберігає рівні часового ряду;  $T$  – це домен часу.

Лінгвістична модель рівнів нечіткого часового ряду  $\tilde{Y}_x$  по атрибуту  $X$ , це розширення відношення  $Y$ :

$$Y_x = X, \tilde{X}, \mu_{\tilde{X}}(X),$$

де  $\tilde{X}$  – абсолютна лінгвістична оцінка по ACL-шкалі рівнів;  $\mu_{\tilde{X}}(X)$  – ступінь приналежності  $X$  до лінгвістичної мітки  $\tilde{X}$ .

Лінгвістична модель моментів часу нечіткого часового ряду  $\tilde{Y}_T$  по атрибуту  $T$ , це розширення відношення  $Y$ :

$$Y_T = T, \tilde{T}, \mu_{\tilde{T}}(T),$$

де  $\tilde{T}$  – абсолютна лінгвістична оцінка по ACL-шкалі моментів часу;  $\mu_{\tilde{T}}(T)$  – ступінь приналежності  $T$  до лінгвістичної мітки  $\tilde{T}$ .

ACL-шкала задається у вигляді моделі:

$$C = \{H, \odot, \Psi\},$$

де  $H$  – загальна множина об'єктів;  $\odot$  – загальна множина функцій та предикатів на множині  $H$ ;  $\Psi$  – загальна множина параметрів

Нечіткий часовий ряд  $\tilde{Y}$  є наслідком реляційної операції з'єднання:

$$\tilde{Y} = Join(Y, \tilde{Y}_x, \tilde{Y}_T).$$

Звідси сформована лінгвістична модель нечіткого часового ряду:

$$\tilde{Y} = T, X, T, \mu_{\tilde{T}}(T), \tilde{X}, \mu_{\tilde{X}}(X).$$

У рамках даної лінгвістичної моделі домен моментів часу є ключовим показником.

Спираючись на теорему FAT (Fuzzy Approximation Theorem) [Ошибка! Источник ссылки не найден.], яка доводить, що будь-яка математична система може бути апроксимована системою, заснованою на нечіткій логіці, є можливість стверджувати, що довільний взаємозв'язок може бути нескінченно точно описаний за допомогою формалізованих висловлювань природної мови «ЯКЩО – ТО».

Здійснення переходу до моделі нечіткого часового ряду у рамках лінгвістичного представлення ліквідує проблему штучних нейронних мереж щодо форми інтерпретації отриманих результатів.

Модель нечіткої тенденції часового ряду визначається як:

$$\tau = \nu, \mu, \alpha, \Delta t,$$

де  $\tau$  – найменування нечіткої тенденції;  $\nu$  – тип нечіткої тенденції;  $\alpha$  – ступінь приналежності нечіткої тенденції нечіткого часового ряду, яка формується на основі нечітких значень рівнів, що її утворюють;  $\mu$  – інтенсивність нечіткої тенденції, контекстне розширення тенденції;  $\Delta t$  – тривалість даного типу нечіткої тенденції.

На основі вищевикладеного часовий ряд нечітких тенденцій, побудований на нечіткому часовому ряді  $\tilde{Y}$ , має вигляд:

$$\tilde{Y}_t = T, \tau,$$

де  $\tau = \nu, \mu, \alpha, \Delta t$ .

Застосування лінгвістичного підходу у задачах інтелектуального аналізу часових рядів базується на рішенні задач аналізу та синтезу.

Фундаментальними фрактальними характеристиками часового ряду є показник Херста  $H$ , індекс фрактальності  $\mu$ , розмірність Хаусдорфа  $D$ , спектральний показник  $b$ .

Існує дві варіації фрактальної розмірності –  $D$  і  $A$ . Так, фрактальну розмірність  $D$  ( $D$  – це оцінка ступеня злому ряду) визначають за формулою:

$$D = 2 - H.$$

Б. Мандельброт у своїй роботі [23] показав, що фрактальна розмірність є зворотною величиною від показника Херста (коефіцієнт Hurst –  $H$ ). Наприклад, при  $H=0,5$  фрактальна розмірність дорівнює  $2(1/0,5)$ , а при  $H=0,8$  фрактальна розмірність дорівнює  $1,25(1/0,8)$ , яка позначається літерою  $A$ . Показник Херста визначається на відріжку  $[0,1]$  і розраховується у наступних межах:

– якщо  $0,5 < H \leq 1$  – ціни є фракталами, підтверджується справедливність Fractal Market Hypothesis (FMH), мають місце «важкі хвости» в розподілі змінних, персистентні серії, тобто позитивна кореляція в зміні цін, присутній чорний шум, який свідчить про наявність трендів на ринку;

– якщо  $H=0,5$  – ціни є випадковими, підтверджується справедливність Efficient Market Hypothesis (EMH), рух цін на фінансові активи є прикладом випадкового броунівського руху (процесу Вінера), тимчасові ряди зазвичай нормально розподілені, відсутня кореляція в зміні вартості активів (пам'ять), підтверджується наявність білого шуму;

– якщо  $0 \leq H < 0,5$  – ціни є фракталами, підтверджується справедливність FMH, мають місце «важкі

хвости» в розподілі змінних, антиперсистентні серії, тобто негативна кореляція в зміні цін, рожевий шум з частими змінами напрямку руху цін.

Розрахунок показника Херста можна провести за такою формулою:

$$R/S = (aN)^H,$$

де  $H$  – показник Херста;  $N$  – число періодів спостережень;  $a$  – задана константа, позитивне число, є константою. Херст емпірично розрахував цю константу для порівняно короткострокових часових рядів природних явищ як  $0,5$ ;  $S$  – середньоквадратичне відхилення ряду спостережень  $x$ ;  $R$  – розмах накопиченого відхилення  $Z_u$ , даний показник є найбільш важливим елементом показника Херста, його обчислюють за формулою:

$$R = \max_{1 \leq u \leq N} (Z_u) - \min_{1 \leq u \leq N} (Z_u),$$

де  $Z_u$  – накопичене відхилення ряду  $x$  від середнього  $x_{cp}$ :

$$Z_u = \sum_{i=1}^u (x_i - x_{cp}).$$

Однак, якщо в якості константи  $a$  використовувати число  $0,5$ , то при невеликій кількості спостережень  $N$  показник Херста має схильність навіть на випадкових рядах оцінювати їх як персистентні, тобто як ті, що володіють трендами, завищуючи  $H$ . Тому для подальшого дослідження ринкових рядів необхідно використовувати константу  $a = p/2$ .

Показник Херста для часових рядів має змістовний сенс. Значення  $H$  і  $D$  показують про ступінь «злому», «зазубреності» часового ряду.

Фрактальні процеси фінансових часових рядів демонструють симетрію експонування – пропорційність співвідношень між коливаннями на різних відстанях поділу. Найбільш яким прикладом є обмінний курс, імовірно зумовлений диференціалами в реальні ставки дохідності. Тому нехай  $X_t$  – це обмінний курс,  $I_t$  – це процентна ставка,  $e$  – індекс очікування,  $\varepsilon_t$  – залишковий складник фінансового часового ряду,  $F$  – іноземна валюта. Структурне рівняння матиме вигляд:

$$X_t = \omega_0 + \omega_1 X_{t-1} + \omega_2 [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \varepsilon_t.$$

Як наголошується у [23], прийняття коефіцієнтів стохастичних процесів може призвести до нелінійної мінливості. На основі цього вираз  $[(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)]$  передбачає фрактальну поведінку. Крім того, номінальні та реальні відсоткові ставки також можуть бути фрактальними, отже, різниця в реальних ставках прибутковості сама по собі є різницею двох незалежних фрактальних процесів.

Методологія моделювання часового ряду базується на розкладанні тимчасового ряду на складові компоненти і моделюванні

значень кожної компоненти окремо. Імовірнісна міра розмірності визначається за формулою:  $[N(|Y_t - Y_{t-1}|) > L / N(|Y_t - Y_{t-1}|)] / L$ . Частка спостережень, що знаходиться за межами порога  $L$  щодо загальної вибірки, варіюється залежно від:

$$[N(|Y_t - Y_{t-1}|) > L / N(|Y_t - Y_{t-1}|)] \approx L^d,$$

де знаком  $\oplus$  позначається асимптотична рівність. У цьому сенсі розмірність – це міра ентропії або хаотичності.

Модифікацією даного методу виступає оцінка середньої неоднорідності процесу, за допомогою корозмірності  $C$ , результатом якої є різниця між розмірністю вкладення  $d$  та фрактальною розмірністю  $D$ :

$$C = D - d.$$

Якщо  $C \uparrow 0$ , то процес називається фрактальним. Відносини між корозмірністю і симетричним масштабуванням задаються наступними рівняннями, в яких  $\tau$  – це тимчасова шкала від 1 до  $T$ , де  $T$  – найбільший часовий масштаб;  $\infty$  – індекс;  $q$  – ряд показників масштабування. Симетрія масштабування має вигляд:

$$\mu(|Y_t - Y_{t-1}|^q) \approx [\mu(|Y_t - Y_{t-1}|^q)] [(\tau / T)^{\zeta(q)}],$$

де  $\zeta$  – функція, яка включає в себе три параметри  $C_1, H, \alpha$ :

$$\zeta(q) = qH - \left\{ [C_1 / (\alpha - 1)] (q^\alpha - q) \right\}, \text{де } \alpha \neq 1;$$

$$\zeta(q) = qH - (C_1 q \ln q), \text{де } \alpha = 1.$$

Параметр  $C_1$  – кодування, пов'язане з масштабуванням засобів вибірки. Коли  $C_1 = 0$ ,  $\zeta(q)$  є лінійним трендом. Коли  $C_1 \uparrow 0$ , кривизна осі  $\zeta(q)$  залежить від корозмірності і розподілу ймовірностей. Коефіцієнт  $\alpha$  характеризує розподіл ймовірності. Випадок  $\alpha = 2$  відповідає розподілу Гауса, тоді як  $\alpha = 1$  відповідає розподілу Коші. Більшість економічних процесів показують  $1 < \alpha < 2$ . У цьому випадку розподіл має більш важкі хвости, ніж стандартна норма, і дисперсія змінюється в часі. Цікавою властивістю рядів, як  $1 < \alpha < 2$ , так і  $0 < C_1 < 1$ , є те, що інтеграція зазвичай не призводить до згладжування. Натомість інтеграл буде показувати дискретні стрибки.

Модель переходу стану для валютного курсу може бути вказана як:

$$X_{t+1} = \omega_0 + \omega_1 X_t + \omega_2 [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \omega_3 S_{Et} X_t + \omega_4 S_{Et} [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \varepsilon_t$$

Стан передбачається ітеративно на основі регресії:

$$S_{Et+1} = \omega_0 + \omega_1 S_{Et} + \omega_2 X_t + \omega_3 (X_t - X_{t-1}) + \varepsilon_t,$$

де швидкість зміни, а також рівень обмінного курсу включений на фактичну ціну на золото на тій підставі, що у практичних застосуваннях це було знайдено для поліпшення результатів.

Для прогнозованої швидкості змін існує симетрія відносно останнього відставання:

$$(X_{t+1} - X_t) = \lambda_{1t} (X_{t+1} - X_{t-1}),$$

де  $\lambda_{1t}$  – коефіцієнт пропорційності, числовий коефіцієнт позначає відстань поділу на ФНЗ, а  $t$  – коефіцієнт вказує на зміну часу. Аналогічним чином для темпів змін:

$$(X_t - X_{t-1}) = \lambda_{2t} (X_t - X_{t-2});$$

рішення для  $\lambda_{2t}$ :

$$\lambda_{2t} = [(X_t - X_{t-1}) / (X_t - X_{t-2})].$$

Модель прогнозування для загального процесу:

$$X_{t+1} = \omega_0 + \omega_1 X_t + \omega_2 [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \omega_3 \lambda_{2t} + \varepsilon_t.$$

Оскільки більшість структурних рівнянь в макроекономіці не передбачають довгострокової фрактальності, є необхідність використання структурного рівняння і побудови шкали коефіцієнтів для залишкової частини:

$$(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1}) = \gamma_{2t} (\varepsilon_t - \varepsilon_{t-2}); \quad \gamma_{2t} = [(\varepsilon_t - \varepsilon_{t-1}) / (\varepsilon_t - \varepsilon_{t-2})],$$

де  $\gamma_{2t}$  – коефіцієнт пропорційності для залишку. Таким чином, модель прогнозування матиме наступний вигляд:

$$X_{t+1} = \omega_0 + \omega_1 X_t + \omega_2 [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \omega_3 \gamma_{2t} + v_t,$$

де  $v_t$  – залишок від цієї регресії.

Основним недоліком моделей є те, що коефіцієнти шкали відомі тільки для поточного періоду, тому розумним рішенням є введення коефіцієнту масштабування у два компоненти, систематичний процес і залишок. Нехай  $\gamma_{2St}$  позначає системну компоненту у  $\gamma_{2t}$ . Зазвичай прогнозист не знає форми цієї компоненти, але може оцінити її за допомогою регресії по лагах:

$$\gamma_{2St} = \omega_0 + \omega_1 \gamma_{2St-1} + \omega_2 \gamma_{2St-2} + v_t.$$

Прогнозоване значення  $\gamma_{2St+1}$  потім включається в рівняння прогнозування. Тоді отримаємо:

$$X_{t+1} = \omega_0 + \omega_1 X_t + \omega_2 [(I_t - \pi_t^e) - (I_{Ft} - \pi_{Ft}^e)] + \omega_3 \gamma_{2St+1} + v_t.$$

Оцінка фрактальних параметрів заснована на масштабуванні логічних засобів абсолютних логічних різниць щодо збільшення відстаней поділу. По суті, це зв'язок між симетрією масштабування і функцією  $\zeta(q)$ . Індекс фрактальності є локальною фрактальною характеристикою фінансового часового ряду.

**Висновки.** У роботі розглянуті та розроблені теоретико-методологічні аспекти прогнозування часових рядів з фрактальними властивостями на основі лінгвістичного моделювання. На прикладі аналізу та прогнозування фінансового часового ряду на основі лінгвістичного моделювання, який передбачає масштабування часового ряду та виділення корозмірності, показано, що агрегування фінансового часового ряду здійснюється з метою укрупнення економічних показників шляхом їх

об'єднання в групу. Формування симетрії масштабування фінансового часового ряду виробляється з метою отримання числових показників перетворень, а також оцінки ступеня порушення симетрії. Особливості запропонованих теоретико-методологічних аспектів прогнозування дозволяють аналізувати та прогнозувати фінансові часові

ряди в умовах, коли існуючі методи, які використовують окремо (апарат математичної статистики або інформаційних технологій), виявляються малоефективними. На основі описаних методів аналізу та прогнозування будуються загальні теоретико-методологічні аспекти, що направлені на формування програмного додатку.

#### Список літератури:

1. Видмант О.С. Прогнозирование финансовых временных рядов с использованием рекуррентных нейронных сетей LSTM. *Общество: политика, экономика, право*. 2018. № 5. С. 63–66.
2. Кілочицька Т.В. Генезис деяких понять нелінійної динаміки в працях вітчизняних вчених (початок ХХ ст.). *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Історія науки і техніки*. Харків, 2013. № 10. С. 57–63.
3. Коротун С.І., Каропа Г.М. Основні поняття і категорії математичної теорії хаоса. *Вісник НУВГП. Економічні науки*. Рівне: НУВГП, 2012. Вип. 3(59). С. 99–107.
4. Ляшенко О.І., Крицун К.І. Дослідження динаміки фондового індексу ПФТС на фінансовому ринку України на різних часових вікнах з 2001 по 2016 роки. *Економіко-математичне моделювання соціально-економічних систем*. 2016. Вип. 21. С. 21–34.
5. Рогоза М.Є., Рамазанов С.К., Мусаєва Е.К. Нелінійні моделі та аналіз складних систем: навч. посібник в 2 ч. Полтава: РВВ ПУЕТ, 2011. Ч. 1. 300 с.
6. Мочерний С.В. Економічна теорія: навч. посіб. Київ: ВЦ «Академія», 2009. 640 с.
7. Шапошнікова І.О. Аналіз часових рядів первинного ринку житлової нерухомості м. Києва. *Економічний вісник університету*. Переяслав-Хмельницький, 2018. № 36/1. С. 140–147.
8. Трофименко І.В. Модель прогнозування показника надійності суднових агрегатів. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. Харків, 2018. № 1(55). С. 140–145.
9. Гардер С.Є., Корніль Т.Л. Фрактальний аналіз та прогнозування тенденції фінансового часового ряду. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Математичне моделювання в техніці та технологіях*, Харків, 2018. № 3 (1279). С. 37–40.
10. Бідюк П.І., Савенков О.І., Баклан І.В. Часові ряди: моделювання і прогнозування : монографія. Київ : ЕКМО, 2003. 144 с.
11. Берзлев О.Ю. Сучасний стан інформаційних систем прогнозування часових рядів. *Управління розвитком складних систем*. 2013. №1. С. 78–82.
12. Нечипоренко А.С. Моделі, методи та інформаційні технології раннього виявлення розладнань в нестационарних квазіперіодичних процесах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків, 2018. 39 с.
13. Лук'яненко І.Г., Жук В.М. Аналіз часових рядів. Побудова Var і Vecm моделей з використанням пакета EViews 6.0. Київ : НУКМА, 2013. 176 с.
14. Koop G., Korobilis D. Bayesian Multivariate Time Series Methods for Empirical Macroeconomics. Now Publishers Inc, 2010. 94 p.
15. Vercellis Carlo. Business intelligence: data mining and optimization for decision making. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2009. 417 p.
16. Pandit S.M., Wu, S.-M. Time series and system analysis with applications. New York: Wiley, 1983. 586 p.
17. Глотов Є.О., Попова О.М. Динаміка виробництва електроенергії в Україні та її прогнозування. *Бізнес Інформ*. Харків, 2018. № 1. С. 152–160.
18. Чайковська І.І. Застосування сучасних інформаційних технологій для моделювання економічних процесів на основі фрактального аналізу. *Університетські наукові записки*. Харків, 2014. № 1. С. 378–387.
19. Найман Э. Расчет показателя Херста с целью выявления трендовости (персистентности) финансовых рынков и макроэкономических индикаторов. *Економіст*. 2009. № 10. С. 25–29.
20. Дубницький В.Ю. Вибір методу прогнозування вартості цінних паперів з урахуванням фрактальної вимірності ряду спостережень. *Бізнес Інформ*. Харків : ХНЕУ, 2011. № 7(1). С. 120–121.
21. Крицун К.І. Мультифрактальний аналіз динаміки фондових індексів України: ПФТС ТА УХ. *Ефективна економіка*. 2016. URL: [http://www.economy.nauka.com.ua/pdf/2\\_2016/38.pdf](http://www.economy.nauka.com.ua/pdf/2_2016/38.pdf) (дата звернення: 17.03.2019).
22. Imanov K.J. Fuzzy Models of Quality Assessment of Social Systems, Lambert Academic Publishing, 2013.
23. Мандельброт Б. Фракталы, случай и финансы. Москва : Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. 234 с.

### **ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ФРАКТАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ НА ОСНОВЕ ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*В работе рассмотрены и разработаны теоретико-методологические аспекты прогнозирования временных рядов с фрактальными свойствами на основе лингвистического моделирования. Проведенный анализ и прогнозирование финансового временного ряда на основе лингвистического моделирования, предусматривающий масштабирование временного ряда и выделения коразмерности, показал, что необходимо осуществлять укрупнение экономических показателей путем их объединения в группу. Формирование симметрии масштабирования финансового временного ряда производится с целью получения числовых показателей преобразований, а также оценки степени нарушения симметрии. Особенности предложенных теоретико-методологических аспектов прогнозирования позволяют анализировать и прогнозировать финансовые временные ряды в условиях, когда существующие методы, которые используют отдельно аппарат математической статистики или информационных технологий, оказываются малоэффективными. На основе описанных методов анализа и прогнозирования строятся общие теоретико-методологические аспекты, направленные на формирование программного приложения.*

**Ключевые слова:** прогнозирование, финансовые временные ряды, лингвистическое моделирование, фрактальные свойства, информационные технологии.

### **THEORETICAL AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF FORECASTING TIME SERIES WITH FRACTAL PROPERTIES BASED ON LINGUISTIC MODELING**

*The paper reviewed and developed the theoretical and methodological aspects of forecasting time series with fractal properties based on linguistic modeling. The analysis and forecasting of financial time series based on linguistic modeling, providing for the scaling of the time series and the allocation of co-dimension, showed that it is necessary to consolidate economic indicators by grouping them together. The formation of symmetry scaling financial time series is made in order to obtain numerical indicators of transformations, as well as assessing the degree of symmetry breaking. The features of the proposed theoretical and methodological aspects of forecasting make it possible to analyze and predict financial time series under the conditions when existing methods that use separately the apparatus of mathematical statistics or information technology prove to be ineffective. On the basis of the described methods of analysis and forecasting, general theoretical and methodological aspects are built to form a software application.*

**Key words:** forecasting, financial time series, linguistic modeling, fractal properties, information technology.



УДК 004.775:625.75

**Осадчий В.В.**

Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького

**Осадча К.П.**

Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького

**Конюхов С.Л.**

Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького

**Сердюк І.М.**

Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького

**Муждабаєв А.М.**

Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького

## **ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ДОРОЖНЬОГО ПОЛОТНА ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАСОБІВ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ**

*У статті розглянуто особливості розробки програмного засобу для виявлення пошкоджень дорожнього полотна за допомогою засобів комп'ютерного зору для підвищення рівня безпеки дорожнього руху транспорту. Під час розробки програмного засобу авторами було використано середовище розробки Microsoft Visual Studio, бібліотеку з відкритим кодом OpenCV та доповнення до бібліотеки Emgu CV. Автори описують етапи та особливості розробки програмного засобу, переліковують та доказують доцільність використання обраних ресурсів розробки. У висновках підведено підсумки роботи, наведено результати розробки та визначено напрям подальших доробок програмного засобу з метою підвищення рівня точності та якості сприйняття інформації засобами комп'ютерного зору.*

**Ключові слова:** штучний інтелект, комп'ютерний зір, пошкодження, аналіз, алгоритм.

**Постановка проблеми.** Аналіз останніх досліджень показав, що у наш час більшість наукових розробок людства так чи інакше пов'язані зі штучним інтелектом та методами його використання у вирішенні задач будь-якого характеру, що і привернуло велику увагу до теми комп'ютерного зору як одного із способів сприйняття навколишнього світу для машин. Комп'ютерний зір це також спроба копіювання зору людини, де в якості очей виступають камери. Нині кількість нових рішень і актуальних додатків для комп'ютерного зору продовжує стрімко зростати. Сфера комп'ютерного зору може бути охарактеризована як дуже різноманітна, молода та динамічна. Поняття зору можливо розділити на такі сфери, як комп'ютерний зір, фотограмметрія, машинний зір, обробка зображень, розпізнавання та аналіз образів. Багато методів і додатків все ще знаходяться в стадії фундаментальних досліджень, але достатня їх кількість вже застосовується в комерційних продуктах, де вони часто складають частину більшої системи, яка може вирішувати складні завдання,

наприклад, у сфері медичних зображень або вимірювання і контролю якості в процесах виготовлення. Також, мабуть, однією з найбільших областей застосування комп'ютерного зору виступає військове застосування. Одними з нових галузей застосування є автономні транспортні засоби, включаючи підводні, наземні (такі як роботи і машини), повітряні. Рівень автономності змінюється від повністю автономних (безпілотних) до транспортних засобів, де системи, засновані на комп'ютерному зорі, підтримують водія або пілота в різних ситуаціях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми створення і застосування методів комп'ютерного зору у різні часи у своїх роботах досліджували Р. Сезеліскі, Дж. Даугман, Дж. Стокман, Л. Шапиро, Чанг Шу (Chang Shu) [9], А. Конушин, Рао Раджеш та інші. Методи комп'ютерного зору для визначення відстані до об'єктів та їх лінійних розмірів розглядали А. Катаєв [3], С. Вовк, В. Гнатушенко, М. Бондаренко. Огляд способів використання відеокамер

в сучасному автомобілі у своїх роботах зробив М. Синдеев [7]. Створенню методів інтелектуального оброблення візуальної інформації сучасними системами комп'ютерного зору присвячено праці С. Гадецької та В. Гороховатського [11].

**Постановка завдання.** Розробка програмного засобу для виявлення пошкоджень дорожнього полотна за допомогою засобів комп'ютерного зору.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Комп'ютерний зір це теорія і технологія машин, які зможуть виявляти, відстежувати і класифікувати об'єкти. Комп'ютерний зір належить до технології створення штучних систем, які отримують інформацію з зображень. Відео-дані можуть бути представлені як відео-послідовність зображень з різних камер або тривимірними даними.

Комп'ютерний зір також може бути описано як доповнення біологічного зору. У біології вивчається зорове сприйняття людини і різних тварин, в результаті чого створюються моделі роботи таких систем в термінах фізіологічних процесів. Комп'ютерний зір вивчає і описує системи комп'ютерного зору, які виконані апаратно або програмно [11].

Підрозділи комп'ютерного зору включають відтворення дій, виявлення подій, стеження, розпізнавання образів, відновлення зображень тощо.

Комп'ютерний зір спочатку слугував для відновлення 3D-структури по 2D-зображенням, зараз дане поняття стало значно ширше, тепер його можна вважати засобом для прийняття рішень про фізичні об'єкти, ґрунтуючись на їх зображеннях [9]. Комп'ютерний зір набуває великого значення в медичній сфері, оскільки обробка зображень в медицині є однією з найбільш важливих сфер його застосування. Ця сфера характеризується тим, що отримує інформацію з відеоданих для постановки медичних діагнозів пацієнтам. Здебільшого відеодані отримуються за допомогою рентгенографії, мікроскопії, томографії, ультразвукових досліджень і ангиографії [9]. Ще однією сферою застосування комп'ютерного зору є промисловість. В промисловості комп'ютерний зір використовують з метою отримання інформації для підтримки виробничого процесу. Сучасне військове поняття, таке як «бойова обізнаність», має на увазі те, що різні датчики, включаючи датчики зображення, надають великий набір інформації про поле бою, який може бути використаний для прийняття стратегічних рішень [11]. Збільшується рівень використання комп'ютерного зору у автономних транспортних засобах, в яких системи

підтримують водія або пілота в різних ситуаціях за допомогою комп'ютерного зору [9].

Реалізація систем комп'ютерного зору дуже сильно залежить від сфери їхнього застосування, вимог до продуктивності і апаратної платформи [3]. Деякі з цих систем є автономними, тоді як інші системи складають підсистеми великих систем, які вже можуть містити підсистеми контролю механічних маніпуляторів, інформаційні бази даних, інтерфейси людина-машина та інше [11].

Під час роботи систем комп'ютерного зору ведеться робота з цифровими зображеннями.

Цифрове зображення – це двовимірне зображення, представлене в цифровому вигляді. Залежно від способу опису, зображення може бути растровим або векторним [5].

В процесі підготовки розробки було проведено аналіз підходів до реалізації програмного засобу. Для реалізації систем комп'ютерного зору найкраще застосовувати вже готові рішення і методи та оптимізувати їх залежно від потреб. На даний момент вже існує велика кількість методів і рішень, які реалізовано в бібліотеках, наприклад, OpenCV, CCV, scikit-learn, EmguCV.

OpenCV це бібліотека з відкритим вихідним кодом. Вона містить в собі безліч алгоритмів комп'ютерного зору, обробки зображень та чисельних алгоритмів загального призначення з відкритим кодом. Бібліотеку реалізовано на C / C ++, також вона розробляється для Python, Java, Ruby, Matlab, Lua та інших. До цієї бібліотеки існує безліч відеоуроків, лекцій, практик.

Бібліотека CCV написана на C і позиціонується як компактна, легка альтернатива OpenCV, тому що з неї вилучені всі несуттєві функції, таким чином, CCV призначена тільки для використання в конкретних додатках [1].

Emgu CV є кросплатформним Net-доповненням для бібліотеки OpenCV для обробки зображень. Розроблено для роботи з NET-сумісними мовами, такими як C #, VB, VC ++, IronPython тощо. Він може бути використаний в Visual Studio, Xamarin, працює з операційними системами Windows, Linux, Mac OS X, IOS, Android і Windows Phone [1].

Для реалізації комп'ютерної системи виявлення та аналізу дефектів поверхонь було обрано Emgu CV, яка є кросплатформною платформою Net для бібліотеки обробки зображень OpenCV. Дозвіл OpenCV функцій, які потрібно використовувати в NET сумісних мов, таких як C #, VB, VC ++, IronPython та інших. Оболонка може бути складена Visual Studio, Xamarin, вона може пра-

цювати на операційних системах Windows, Linux, Mac OS X, Android і Windows Phone.

Для реалізації проекту вважаємо найбільш доцільним використовувати бібліотеку OpenCV завдяки тому, що в ній вже присутня велика кількість рішень для різних завдань комп'ютерного зору і обробки зображень. Для цього було використано ряд модулів бібліотеки:

Sxcore – ядро містить базові структури даних і алгоритми: базові операції над багатовимірними числовими масивами; матрична алгебра, математичні функції, генератори випадкових чисел; запис / відновлення структур даних в / з XML; базові функції 2D графіки.

CV – модуль обробки зображень і комп'ютерного зору: базові операції над зображеннями; аналіз зображень; аналіз руху, спостереження за об'єктами; виявлення об'єктів, зокрема осіб; калібрування камер, елементи відновлення просторової структури [2].

Highgui – модуль для введення / виведення зображень і відео, створення призначеного для користувача інтерфейсу: захоплення відео з камер і з відео-файлів, читання / запис статичних зображень; функції для організації UI.

Svaux – експериментальні і застарілі функції: комп'ютерний зір: стерео-калібрації, саме калібрування; пошук стерео-відповідності, кліки в графах; знаходження і опис рис обличчя

CvCam – захоплення відео: дозволяє здійснювати захоплення відео з цифрових відео-камер (підтримка припинена в останніх версіях).

В процесі розробки після створення проекту та підключення до нього бібліотеки Emgu CV було створено форми. Окрім цього, виникла потреба вирішити проблему отримання даних для системи комп'ютерного зору. У нашому випадку система служить для виявлення пошкоджень дорожнього полотна на підставі відеоданих з відеореєстратора автомобіля. Для отримання даних відео файлу було використано вбудований клас OpenFileDialog. Далі було збережено відео-файл в екземпляр класу від Emgu CV під назвою Capture, який відповідає за захоплення відео-потoku та зберігає відео-файл і дані про нього. З об'єкта Capture ми отримуємо такі дані, як загальна кількість кадрів, FPS і зображення кожного кадру для обробки під час відображення відео.

Перед тим, як на кожному окремому кадрі відео виконувати пошук пошкоджень дорожнього полотна, виникає потреба провести попередню обробку кожного зображення задля подальшого застосування відеоданих з тим, щоб вони задо-

вольняли деяким умовам залежно від використовуваного методу [4]. В нашому випадку було виконано спробу прибрати шуми і збільшити контрастність зображення для виявлення потрібної інформації. Для цього було використано процедури фільтрації.

Процедури фільтрації покликані вирішити конкретні завдання попередньої обробки: усунути адитивні високочастотні перешкоди на оригінальному документі, підкреслити контурні переходи на зображенні, виключити з початкового зображення різкі перепади основного фонового складника та інше. Існує декілька типів фільтрації зображень: широколінійна низькочастотна лінійна фільтрація; спрямована низькочастотна лінійна фільтрація; медіанні фільтри; векторні медіанні фільтри.

Всі алгоритми контрастування так чи інакше виконують обробку зображення, використовуючи гістограму розподілу яскравості елементів зображення в локальній області або всього масиву даних. До таких процедур контрастування відносять: глобальне розтягнення; локальне розтягнення; локальне рівномірне перетворення [7].

Для реалізації пошуку пошкоджень дорожнього полотна в проекті використовувалося два різних методи: пошук за кольором та пошук по контуру.

Найпоширенішим способом виділити об'єкт – є колір. Однією з найважливіших проблем пошуку за кольором – є вплив такого фактору, як освітленість. Не можна також забувати, що видимий колір – це результат взаємодії спектра випромінюваного світла і поверхні, тому для створення методу для виявлення місць пошкоджень дорожнього покриття за кольором ми розбили зображення на шари, що були збережені у відтінках сірого кольору для подальшої обробки на одному з шарів. У цьому шарі пікселі, колір яких вище певного порогу, приймали колір сірого порогу, який можна регулювати в ручну. Даний метод полягає в тому, що пошкоджені ділянки дорожнього полотна будуть темніші, ніж інші, що дозволяє виділити їх чорним кольором. Недоліком даного методу є те, що на нього впливає безліч сторонніх чинників. Наприклад, після дощу в калюжах буде відображатися небо, що зробить неможливим визначення пошкодження цим методом, оскільки пошкоджені ділянки будуть світліші, а також на цей метод дуже сильно впливає освітлення і наявність тіней на ділянці дороги.

Другий реалізований метод – це метод пошуку по контуру.

Контурний аналіз – це один з методів опису, зберігання, розпізнавання, порівняння та пошуку графічних образів / об'єктів [10].

Під час проведення контурного аналізу були виділені потреби:

- контур має містити достатню інформацію про форму об'єкта;
- внутрішні точки об'єкта до уваги не беруться.

Таке положення накладає суттєві обмеження на область застосування контурного аналізу, які зазвичай пов'язані з проблемами виділення контуру на зображеннях: об'єкт може не мати чіткої межі; об'єкт може бути зашумлений перешкодами; перекриття об'єктів або їх угруповання призводить до того, що контур виділяється невірно і не відповідає границям об'єкта. Однак перехід до розгляду тільки контурів об'єктів дозволяє відійти від простору зображення до простору контурів, що істотно знижує складність алгоритмів і обчислень.

Контурний аналіз має досить слабку стійкість до перешкод, і будь-який перетин або часткова видимість об'єкта призводить або до неможливості детектування, або до помилкових спрацювань, але простота і швидкодія контурного аналізу дозволяють цілком успішно застосовувати даний підхід.

Метою роботи була розробка програмного модуля, який спрощує виявлення пошкоджених ділянок дорожнього полотна на підставі відео з відеореєстраторів автомобілів. Програмний засіб може бути застосованим Укравтодором або іншими подібними підприємствами для визначення рівня якості дороги або аналізу рівня її пошкодження на підставі відео з відеореєстраторів звичайних користувачів автомобілів.

Для розробки програмного засобу було створено три класи: клас Form1, клас VideoHendler та клас Setings.

Клас Form1 реалізує собою головну форму програмного засобу та реалізує методи відкриття нового відео та методи взаємодії з ним: програти, пауза, стоп [6], методи для взаємодії з класом Setings та VideoHendler (рис. 1).

Клас Setings реалізує собою форму налаштувань в програмному засобі та методи передачі цих значень цих налаштувань до інших класів. У цьому класі вибирається метод пошуку пошкоджень дорожнього полотна та значення фільтрів для роботи цього методу.

Клас VideoHendler представляє собою набір методів, які реалізують обробки кожного окремого кадру або різні методи пошуку нерівностей.

**Висновки.** Таким чином, дослідивши можливості застосування комп'ютерного зору на практиці, було розроблено програмний засіб для виявлення пошкоджень дорожнього полотна за допомогою засобів комп'ютерного зору.

У ході роботи ми дійшли висновку, що оптимальною мовою розробки програмного засобу є C#, а оптимальним середовищем програмування – є Microsoft Visual C#, тому що воно задовольняє усім вимогам об'єктно-орієнтованого методу програмування, є простим у розробці та подальшому використанні програмного засобу. Для розширення можливостей та функціоналу середовища розробки було вирішено під час розробки програмного засобу використовувати бібліотеку

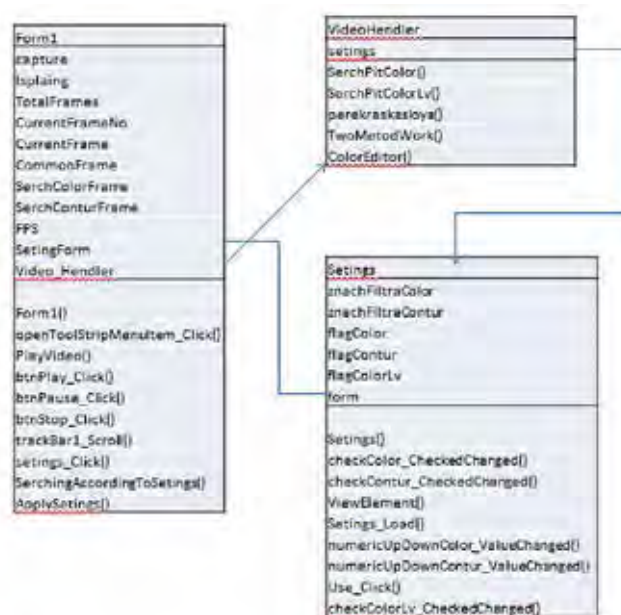


Рис. 1. Архітектура програмного засобу

з відкритим кодом OpenCV та доповнення до бібліотеки Emgu CV. У програмному засобі для виявлення пошкоджень дорожнього полотна було використано два методи пошуку пошкоджень: пошук за кольором та пошук по контуру. Використання двох методів одночасно є доцільним в умовах неповної яскравості освітленості дорожнього полотна та під час обмерзання, засніження

та інших умов, які сприяють створенню шумів зображення.

У подальшій роботі планується доробка та розвиток програмного засобу для виявлення пошкоджень дорожнього полотна за допомогою засобів комп'ютерного зору з метою розширення його функціоналу та зменшення рівня похибок у процесі пошуку нерівностей.

### Список літератури:

1. OpenCV – Роботи? Это просто! *RoboCraft: сообщество любителей робототехники* URL: <http://robocraft.ru/page/opencv/> (дата звернення: 10.02.2019).
2. Bradski G., Kaehler A. *Learning OpenCV – Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 2008. 580 p.
3. Гадецька С.В., Гороховатський В.О. Методи структурної класифікації зображень на засадах баєсовської теорії прийняття рішень. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2018. Вип. 2. С. 90–97.
4. Катаев. А., Алексеев А. Введение в компьютерное зрение. М: Singularis Lab, Ltd., 2016. 40 с.
5. Лукьянича А., Шишкин А. Цифровая обработка видеоизображений. Москва : «Ай-Эс-Эс Пресс», 2009. 518 с.
6. Мейер Б. Объектно-ориентированное конструирование программных систем. Москва : Интернет университет, 2005. 1204 с.
7. Потапов А. Распознавание образов и машинное восприятие: Общий подход на основе принципа минимальной длины описания. Санкт-Петербург : Политехника, 2011. 548 с.
8. Синдеев М. Анализ Компьютерных систем технического зрения современных автомобилей Системы обработки информации : зб. наук. пр. / Харк. нац. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. Харків, 2014. С. 41-45.
9. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. Москва :Издательский дом «Вильямс», 2004. 928 с.
10. Chang Shu, Rose G. *Introduction to Computer Vision*. Winter, 2008. 24 с.
11. Шапиро Л., Стокман Дж.С. Компьютерное зрение / пер. с англ. А.А. Богуславского. 3-е изд. (эл.). Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 717 с.

### ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА С ПОМОЩЬЮ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

*В статье рассмотрены особенности разработки программного средства для обнаружения поврежденных дорожнего полотна с помощью средств компьютерного зрения для повышения уровня безопасности движения дорожнего транспорта. При разработке программного средства авторами были использованы среда разработки Microsoft Visual Studio, библиотека с открытым кодом OpenCV и дополнения в библиотеку Emgu CV. Авторы описывают этапы и особенности разработки программного средства, перечисляют и доказывают целесообразность использования выбранных ресурсов разработки. В выводах подведены итоги работы, приведены результаты разработки и определены направления дальнейших доработок программного средства с целью повышения уровня точности и качества восприятия информации средствами компьютерного зрения.*

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, компьютерное зрение, повреждения, анализ, алгоритм.

### FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE FOR DETERMINING THE DAMAGE TO THE ROAD CIRCULATION BY COMPUTER VIEWS

*The article describes the features of the development of software for detecting damage to the roadway using computer vision tools to increase the level of traffic safety of vehicles. In developing the software, the authors used the Microsoft Visual Studio development environment, the open source library OpenCV, and additions to the Emgu CV library. The authors describe the stages and features of software development, re-create and prove the expediency of using selected development resources. The conclusions summarized the work, the results of the development and the directions for further improvements of the software to determine the level of accuracy and quality of information perception by means of computer vision.*

**Key words:** artificial intelligence, computer vision, damage, analysis, algorithm.

**Павлов В.Г.**

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

## ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЯ ДІНАМІЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ПОТОЧНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

*У статті проаналізовані методи статичного та динамічного балансування навантаження обчислювальних пристроїв в умовах, коли ці пристрої відрізняються за своєю обчислювальною потужністю. Запропоновано спосіб динамічного балансування на основі універсального критерію, а саме – мінімального часу виконання усіх завдань. В якості показника навантаженості обчислювального пристрою використовується його часові характеристики. Покрокова послідовність динамічного балансування розглянута на прикладі. Визначені перспективи подальшого вдосконалення.*

**Ключові слова:** розподілені обчислення, балансування навантаження, динамічне балансування, оцінювання навантаження, критерії балансування, диспетчер навантаження.

**Постановка проблеми.** Розробка систем штучного інтелекту та пов'язана з цим необхідність обробки величезних обсягів даних вимагає різкого підвищення ефективності обчислень. Одна з найбільш відомих міжнародних дослідницьких компаній **International Data Corporation** ще у 2011 році надала результати своїх досліджень, згідно з якими обсяг обчислень зростає експонентно та подвоюється кожні 3,5 місяці, тобто у п'ять разів швидше, ніж вважалося раніше за відомим законом Мура [1]. Наступні роки лише підтвердили цей прогноз.

Звичайно, підвищити ефективність обчислень можна шляхом застосування більш потужних комп'ютерів, але цей шлях інтенсивного технологічного розвитку має свої межі. Тому вже давно вихід знайдений у поєднанні обчислювальних потужностей окремих комп'ютерів, між якими розподіляються або окремі частки однієї задачі, або взагалі окремі задачі. При цьому вкрай важливою стає проблема оптимального розподілу задач (або окремих частин однієї задачі) між усіма обчислювальними пристроями, що виконують ці розподілені обчислення, тобто балансування навантаження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оскільки проблема балансування навантаження обчислювальних пристроїв існує досить давно, то шляхи та методи її вирішення обговорюються у численних публікаціях на цю тему. Класифікацію та загальний огляд методів балансування здійснено у роботах V. Thakur, S. Kumar [2], Debankur Mukherjee, Sem Borst, Johan van Leeuwen, Philip Whiting [3], B. Hendrickson, K. Devine [4],

Y.F. Hu, R.J. Blake, D.R. Emerson [5], Бо Тянь, М.А. Посыпкина, И.Х. Сигала [6], Д. В. Белькова [7], А. Емельянова [8] та А.С. Хританкова [9]. Статті Hong, J.H. No, S.Y. Kim [10], Sarhan Ebada, Ghalwash Atif, Mohamed Khafagy [11], Saeed Sharifiana, Seyed A. Motamedia, Mohammad K. Akbari [12], Zhang Lin, Li Xiao-ping [13] та Neeraj Rathore [14] присвячено балансуванню навантаження WEB-серверів. У публікації Е.Г. Игнатенко [15] більш детально розглянуто балансування у кластерних системах, а В.А. Райхлин, та Р.К. Классен [16] дослідили балансування у розподілених базах даних. Однак у наведених роботах під час балансування обчислювальних пристроїв майже не приділяється уваги дослідженню часових характеристик та балансуванню на їх основі.

**Постановка завдання.** Як відомо, балансування поділяється на статичне та динамічне. Перший вид балансування виконується перед початком обчислень та дозволяє заздалегідь оптимально розподілити навантаження між обчислювальними пристроями за заданими критеріями. Але ця перевага зводиться нанівець, коли нові завдання виникають вже під час обчислень, та на них треба оперативно реагувати. В цьому випадку використовуються методи динамічного балансування, яке в більшості методів зводиться до перерозподілу завдань між обчислювальними пристроями (ОП) з урахуванням оновлених даних. Цей перерозподіл виконується або на основі обміну інформацією між самим обчислювальними пристроями, тобто децентралізовано, або під управлінням диспетчера навантаження, який виконує роль єдиного центра керування. Найчастіше диспетчер наван-

таження здійснює пошук оптимального варіанта балансу навантаження обчислювальних пристроїв згідно з заданими критеріями в умовах стислого часу, оскільки за появи нових завдань знайдений варіант балансування перестає бути актуальним. В якості подібних критеріїв виступають наступні [7, с. 72]:

1. максимально рівномірний розподіл завдань за усіма ОП;
2. максимальна продуктивність системи для усіх додатків;
3. мінімальний час відповіді системи на кожний запит;
4. максимально швидке виконання завдань згідно з розкладом.

Оскільки безпосередньо або опосередковано у кожному з цих критеріїв йдеться про часові характеристики, то пропонується їх звести до одного універсального: **мінімальний час виконання усіх завдань на наявних ОП**. Цей критерій найбільшою мірою відповідає головній цілі використання розподілених обчислень – досягнення максимальної їх продуктивності.

Другим фактором, який необхідно враховувати під час балансування навантаження ОП, є їх обчислювальна потужність. У більшості методів балансування вона або не враховується, або вважається однаковою у всіх ОП. Це, звичайно, створює суттєві обмеження на застосування цих методів в умовах, коли виконується балансування між ОП, які мають різну швидкодію обчислень, хоча й забезпечують функціональну однорідність [9, с. 68].

Введемо також третє обмеження: завдання обробляються диспетчером у тій же послідовності, в якій вони поступають, тобто підтримується дисципліна FIFO, що не потребує зміни порядку обробки завдань та виконання будь-якого їх попереднього упорядкування. Також ці завдання повинні бути незалежними одне від одного, а саме результати виконання одного з них не є вхідними даними для будь-якого наступного в межах часового інтервалу балансування. Але для реалізації балансування завдань висувається необхідна умова: для кожного завдання повинна бути відома метрика, яка характеризує його обчислювальну складність. Ця або схожі метрики використовуються авторами під час розгляду статичних методів балансування, наприклад [7, с. 73] та [6, с. 13–14], але не знайдено прикладів її застосування у методах динамічного балансування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розглянемо спосіб балансування послідовності з  $M$  завдань, які створюють певну послідовність, та

кожне з яких має власну відмінну обчислювальну складність  $Z_i$ , де  $i = 1, 2 \dots M$ . Балансування здійснюється у системі, яка складається з  $N$  обчислювальних пристроїв, які в загальному випадку мають різні обчислювальні потужності:  $P_j$ , де  $j = 1, 2 \dots N$ . Тоді час виконання  $i$ -того завдання на  $j$ -том обчислювальному пристрої  $T_{ij}$  визначається як:

$$T_{ij} = \frac{Z_i}{P_j}$$

Звичайно, вважається, що  $M \gg N$ , інакше балансування навантаження ОП зводиться до тривіальної статичної задачі.

Введемо поняття «поточний час роботи ОП $_j$   $\tau_j$ », значення якого буде відбивати час, який минув з початку роботи ОП $_j$ . На першому етапі, коли ОП вільні та знаходяться в режимі очікування,  $\tau_1 = \tau_2 = \dots \tau_j = \dots \tau_N = 0$ .

Згідно з третім обмеженням, яке було введено раніше, спочатку розподіляється завдання  $Z_1$ , потім  $Z_2, \dots Z_N$ . Критерієм розподілу пропонується вважати найменший час роботи  $\tau_j$ , який буде мати  $j$ -те ОП порівняно з усіма іншими після виконання завдання  $Z_1$ . Оскільки до розподілу завдання  $Z_1$  усі ОП знаходилися у режимі очікування ( $\tau_1 = \tau_2 = \dots \tau_j = \dots \tau_N = 0$ ), то найменший час роботи  $\tau_j$  забезпечить те  $j$ -те ОП, яке швидше за інших зможе виконати завдання  $Z_1$ , тобто

$$\min \{T_{ij}\} \text{ для } j \in 1, 2, \dots N$$

В умовах, коли ОП мають різну обчислювальну потужність, звичайно за найменший час  $T_{1j}$  завдання  $Z_1$  виконає ОП з найбільшою обчислювальною потужністю. Нехай це ОП має номер  $k$ , де  $k \in 1, 2, \dots N$ . Тому це завдання буде розподілено диспетчером саме йому, а час  $\tau_k$  буде збільшений на час  $T_{1k}$  та буде становити  $\tau_k = T_{1k}$ . Під час розподілу диспетчером завдання  $Z_2$  критерієм його призначення для виконання якомусь ОП знову ж таки буде найменше значення  $\tau_j$ , але вже за інших початкових умов:

$$\tau_1 = \tau_2 = \dots \tau_j = \dots \tau_N = 0 \text{ для } j \in 1, 2, \dots N, \text{ але } j \neq k \text{ та } \tau_k = T_{1k}$$

Тобто диспетчер знову повинен «приміряти» нове завдання до кожного ОП, але ті ОП, які вже виконують попередні завдання, будуть мати інші початкові значення поточного часу роботи.

До речі, якщо деякий ОП має суттєво більшу обчислювальну потужність порівняно з усіма іншими, то за цією умовою завдання  $Z_2$  може бути розподілено диспетчером також йому, оскільки це ОП виконає два завдання ( $Z_1$  та  $Z_2$ ) за менший час, ніж будь-яке інше ОП тільки завдання  $Z_2$ :

$$\tau_k = T_{1k} + T_{2k} < \tau_j \text{ для } j \in 1, 2, \dots N, \text{ але } j \neq k$$

Доведемо, що послідовне застосування для кожного з  $M$  завдань подібного способу розподілу

навантаження серед  $N$  обчислюваних пристроїв забезпечить **мінімальний час виконання усіх завдань на наявних ОП** –  $\Theta^M$ .

Нехай на кроці  $i$  розподіляється завдання  $Z_i$ . При цьому попередні  $i-1$  завдання вже розподілені за критерієм мінімального часу їх виконання, який визначається наступним чином:

$$\Theta^{i-1} = \max \{ \tau_j \} \text{ для } j \in 1, 2, \dots, N$$

Нехай  $k$  – номер ОП, яке буде працювати найбільш тривалий час, та, відповідно, буде визначати  $\Theta^{i-1}$ , що буде дорівнювати  $\tau_k$ .

За підсумками розподілу завдання  $Z_i$ , можливо усього три варіанти:

1. Завдання  $Z_i$  буде розподілено якомусь іншому  $s$ -тому ОП ( $s \neq k$ ), **поточний час роботи  $\tau_s$** , якого навіть з урахуванням  $T_{is}$  не перевищить  $\Theta^{i-1}$ . В цьому випадку значення мінімальний час виконання усіх  $i$  завдань не зміниться, тобто  $\Theta^{i-1} = \Theta^i$ .

2. Завдання  $Z_i$  буде розподілено також якомусь іншому  $s$ -тому ОП ( $s \neq k$ ), але **поточний час роботи  $\tau_s$** , якого з урахуванням  $T_{is}$  перевищує  $\Theta^{i-1}$ , тобто нове значення  $\Theta^i > \Theta^{i-1}$ . Оскільки  $\Theta^i$  тепер буде визначати саме  $\tau_s$ , а на попередньому кроці найбільше значення мав  $\tau_k$ , то буде мати місце нерівність:

$$\tau_s - T_{is} < \tau_k < \tau_s$$

Тобто у результаті розподілу завдання  $Z_i$  відбулося збільшення **мінімального часу виконання  $i$  завдань**  $\Theta^i$ , але це збільшення найменше з усіх можливих та не перевищує  $T_{is}$

3. Завдання  $Z_i$  буде розподілено також  $k$ -тому ОП, оскільки збільшення мінімального часу виконання буде в цьому випадку найменше порівняно з тим, якщо б завдання  $Z_i$  було б розподілено до якогось іншого ОП. В цьому випадку мінімальний час виконання збільшиться саме на величину  $T_{ik}$ :

$$\Theta^i = \Theta^{i-1} + T_{ik}$$

Таким чином, за підсумками розгляду усіх трьох варіантів подій доведено, що розподіл завдання  $Z_i$  призведе до мінімально можливого збільшення **мінімальний час виконання**, яке буде знаходитися у межах від 0 до  $T_{ik}$ , де  $k$  – номер ОП, яке визначало **мінімальний час виконання** на попередньому кроці.

Таким чином, послідовне застосування подібного способу розподілу для кожного з  $M$  завдань забезпечує найменший час їх виконання за допомогою  $N$  обчислювальних пристроїв, що й відповідає поставленим умовам.

Для ілюстрації запропонованого способу балансування навантаження розглянемо приклад.

#### Приклад.

Нехай виконується балансування 8 завдань, кожне з яких має свою відмінну складність:

$$\begin{aligned} Z_1 = 5; & & Z_2 = 3; & & Z_3 = 2; & & Z_4 = 1; \\ Z_5 = 7; & & Z_6 = 4; & & Z_7 = 8; & & Z_8 = 9. \end{aligned}$$

Балансування відбувається для 4 обчислювальних пристроїв, обчислювальна потужність яких визначається наступним чином:

$$P_1 = 2; \quad P_2 = 1; \quad P_3 = 1; \quad P_4 = 3.$$

Зазначимо, що цифри у прикладах мають умовні значення, які допомагають зрозуміти хід балансування та легко перевірити результати обчислень. Але навіть через умовність самих значень ці цифри добре ілюструють ситуацію, коли  $i$  завдання, і обчислювальні пристрої мають досить різні характеристики, що відповідає постановці завдання.

Згідно зі способом балансування, що пропонується, **поточний час** роботи для кожного ОП має нульові значення, тобто  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = 0$

#### Крок 1 (розподіл завдання $Z_1$ )

Спочатку диспетчер визначає час виконання завдання  $Z_1$  для кожного з чотирьох ОП:

$$\begin{aligned} T_{11} = \frac{Z_1}{P_1} = \frac{5}{2} & & T_{12} = \frac{Z_1}{P_2} = \frac{5}{1} & & T_{13} = \frac{Z_1}{P_3} = \frac{5}{1} \\ T_{14} = \frac{Z_1}{P_4} = \frac{5}{3} & & & & \end{aligned}$$

Оскільки  $T_{14}$  має найменше значення, то диспетчер направляє  $Z_1$  на ОП 4.

#### Крок 2 (розподіл завдання $Z_2$ )

Оскільки на попередньому кроці  $Z_1$  виконувалася на ОП 4, то його поточний час роботи  $\tau_4 = 5/3$ , поточний час роботи для інших ОП мають знову ж таки нульові значення:  $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 0$ . Знову визначаємо час виконання завдання  $Z_2$  для кожного з чотирьох ОП:

$$\begin{aligned} T_{21} = \frac{Z_2}{P_1} = \frac{3}{2} & & T_{22} = \frac{Z_2}{P_2} = \frac{3}{1} & & T_{23} = \frac{Z_2}{P_3} = \frac{3}{1} \\ T_{24} = \frac{Z_2}{P_4} = \frac{3}{3} & & & & \end{aligned}$$

Але тепер шукаємо найменше значення серед значень **поточного часу роботи** для кожного з ОП з урахуванням їх початкових значень:

$$\begin{aligned} \tau_1^{(2)} = 0 + T_{12} = \frac{3}{2} & & \tau_2^{(2)} = 0 + T_{22} = \frac{3}{1} \\ \tau_3^{(2)} = 0 + T_{23} = \frac{3}{1} & & \tau_4^{(2)} = \frac{5}{3} + T_{12} = \frac{8}{3} \end{aligned}$$

Оскільки найменше значення має  $\tau_1$ , то диспетчер направляє  $Z_2$  на ОП 1.

#### Крок 3 (розподіл завдання $Z_3$ )

Маємо наступні значення показників **поточного часу роботи**:

$$\tau_1 = 3/2; \quad \tau_2 = 0; \quad \tau_3 = 0 \quad \tau_4 = 5/3$$

Визначаємо час виконання завдання  $Z_3$  та можливі нові значення показників  $\tau_j$ :

$$\tau_1^{(3)} = \frac{3}{2} + \frac{2}{2} = \frac{5}{2} \quad \tau_2^{(3)} = 0 + \frac{2}{1} = \frac{2}{1}$$



$$\tau_3^{(3)} = 0 + \frac{2}{1} = \frac{2}{1} \quad \tau_4^{(3)} = \frac{5}{3} + \frac{2}{3} = \frac{7}{3}$$

Найменше значення мають  $\tau_2$  та  $\tau_3$ , тому диспетчер направляє  $Z_3$  на ОП 2.

**Крок 4** (розподіл завдання  $Z_4$ )

Значення показників **поточного часу роботи**:

$$\tau_1 = 3/2; \quad \tau_2 = 2/1; \quad \tau_3 = 0 \quad \tau_4 = 5/3$$

Визначаємо час виконання завдання  $Z_4$  та можливі нові значення показників  $\tau_j$ :

$$\tau_1^{(4)} = \frac{3}{2} + \frac{1}{2} = \frac{4}{2} \quad \tau_2^{(4)} = \frac{2}{1} + \frac{1}{1} = \frac{3}{1}$$

$$\tau_3^{(4)} = 0 + \frac{1}{1} = \frac{1}{1} \quad \tau_4^{(4)} = \frac{5}{3} + \frac{1}{3} = \frac{6}{3}$$

Найменше значення має  $\tau_3$ , тому диспетчер направляє  $Z_4$  на ОП 3.

Оскільки дії, які здійснюються на наступних кроках (5–8), вже зрозумілі, то немає сенсу розглядати їх у подробицях, а просто продемонструємо результати у вигляді зведеної таблиці.

Зведена таблиця балансування на кроках 5–8

		ОП 1	ОП 2	ОП 3	ОП 4	
Крок 5	$Z_5 = 7$	$\tau_1 = 3/2$	$\tau_2 = 2/1$	$\tau_3 = 1/1$	$\tau_4 = 5/3$	$\Theta^5 = 12/3$
		$\tau_1^{(5)} = \frac{3}{2} + \frac{7}{2} = \frac{10}{2}$	$\tau_2^{(5)} = \frac{2}{1} + \frac{7}{1} = \frac{9}{1}$	$\tau_3^{(5)} = \frac{1}{1} + \frac{7}{1} = \frac{8}{1}$	$\tau_4^{(5)} = \frac{5}{3} + \frac{7}{3} = \frac{12}{3}$	
Крок 6	$Z_6 = 4$	$\tau_1 = 3/2$	$\tau_2 = 2/1$	$\tau_3 = 1/1$	$\tau_4 = 12/3$	$\Theta^6 = 12/3$
		$\tau_1^{(6)} = \frac{3}{2} + \frac{4}{2} = \frac{7}{2}$	$\tau_2^{(6)} = \frac{2}{1} + \frac{4}{1} = \frac{6}{1}$	$\tau_3^{(6)} = \frac{1}{1} + \frac{4}{1} = \frac{5}{1}$	$\tau_4^{(6)} = \frac{12}{3} + \frac{4}{3} = \frac{16}{3}$	
Крок 7	$Z_7 = 8$	$\tau_1 = 7/2$	$\tau_2 = 2/1$	$\tau_3 = 1/1$	$\tau_4 = 12/3$	$\Theta^7 = 20/3$
		$\tau_1^{(7)} = \frac{7}{2} + \frac{8}{2} = \frac{15}{2}$	$\tau_2^{(7)} = \frac{2}{1} + \frac{8}{1} = \frac{10}{1}$	$\tau_3^{(7)} = \frac{1}{1} + \frac{8}{1} = \frac{9}{1}$	$\tau_4^{(7)} = \frac{12}{3} + \frac{8}{3} = \frac{20}{3}$	
Крок 8	$Z_8 = 9$	$\tau_1 = 7/2$	$\tau_2 = 2/1$	$\tau_3 = 1/1$	$\tau_4 = 20/3$	$\Theta^8 = 16/2$
		$\tau_1^{(8)} = \frac{7}{2} + \frac{9}{2} = \frac{16}{2}$	$\tau_2^{(8)} = \frac{2}{1} + \frac{9}{1} = \frac{11}{1}$	$\tau_3^{(8)} = \frac{1}{1} + \frac{9}{1} = \frac{10}{1}$	$\tau_4^{(8)} = \frac{20}{3} + \frac{9}{3} = \frac{29}{3}$	
Підсумк.		$\tau_1 = 16/2$	$\tau_2 = 2/1$	$\tau_3 = 1/1$	$\tau_4 = 20/3$	

Таким чином, остаточний результат балансування у розглянутому прикладі:

ОП 1: виконуються завдання  $Z_2, Z_6$  та  $Z_8, \tau_1 = 16/2 = 8$

ОП 2: виконується завдання  $Z_3, \tau_2 = 2/1 = 2$

ОП 3: виконується завдання  $Z_4, \tau_3 = 1/1 = 1$

ОП 4: виконуються завдання  $Z_1, Z_5$  та  $Z_7, \tau_4 = 20/3 = 7,67$

Мінімальний час виконання усіх завдань:  $\Theta^8 = \max \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4\} = 8$

Рішення може бути масштабованим для будь-якої кількості завдань та ОП, оскільки не вводяться будь-які обмеження.

**Висновки.**

1. У статті проаналізовані методи статичного та динамічного балансування навантаження обчислювальних пристроїв в умовах, коли ці пристрої відрізняються за своєю обчислювальною потужністю.

2. Запропоновано спосіб динамічного балансування на основі універсального критерію, а саме – мінімального часу виконання усіх завдань.

3. Запропоновано в якості показника завантаженості обчислювального пристрою використовувати поточний час його роботи, тобто загальний час, що минув з початку роботи й до моменту здійснення балансування та коли ОП був завантажений виконанням завдань.

4. Доведено, що застосування цього способу дійсно забезпечує мінімальний час виконання усіх завдань на наявних ОП.

5. Наведено приклад покрокової послідовності динамічного балансування.

6. Перевірена масштабованість запропонованого способу динамічного балансування на будь-яку кількість завдань та довільну кількість обчислювальних пристроїв.

7. Визначені основні напрями розвитку запропонованого способу балансування, а саме:

- поширення способу диспетчеризації на випадки, коли загальний потік завдання не є безперервним, та виникають паузи;
- поширення способу диспетчеризації на випадок зміни кількості обчислювальних пристроїв під час балансування;
- вирішення питань надійності та захищеності диспетчеризації.

**Список літератури:**

1. Gantz John, Reinsel David. Extracting Value from Chaos. IDC Analyze the Future, Sponsored by EMC Corporation. June 2011. URL: <https://www.emc.com/collateral/demos/microsites/emc-digital-universe-2011/index.htm>. (дата звернення: 01.2011).
2. Thakur V., Kumar S. Load Balancing Algorithm: An Analytical Study. *The IUP Journal of Computer Sciences*. 2014. Vol. VIII. № 2. P. 25–34.
3. Mukherjee, D., Borst, S. C., van Leeuwen, J. S. H., & Whiting, P. A. Universality of Power-of-2 Load Balancing Schemes. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*. 2016. Issue 44(2). P. 36–38.
4. Hendrickson B., Devine K. Dynamic load balancing in computational mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2000. Vol. 184. P. 485–500.
5. Hu Y. F., Blake R.J., Emerson D.R. An optimal dynamic load balancing algorithm. *Concurrency – Practice and Experience*. 1998. Vol. 10. P. 467–483.
6. Бо Тянь, Посыпкин М.А., Сигал И.Х. Балансировка нагрузки на основе оценок алгоритмической сложности подзадач. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2015. №1. С. 10–18.

7. Бельков Д.В. Алгоритмы балансировки загрузки процессоров параллельной вычислительной системы. *Наукові праці ДонНТУ*. 2006. випуск 106. С. 72–76.
8. Емельянов А. Балансировка нагрузки: основные алгоритмы и методы. *blog.selectel.ru*. 2015. URL: <http://blog.selectel.ru/balansirovka-nagruzkiosnovnye-algoritmy-i-metody>. (дата звернення: 05.02.2015).
9. Хританков А.С. Модели и алгоритмы распределения нагрузки. Алгоритмы на основе сетей СМО. *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2009. №2. С. 65–79.
10. Hong Y.S., No J.H., Kim S.Y. DNS-based load-balancing in distributed web- server systems. *Fourth IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded and Ubiquitous Systems*. 2006. P. 4.
11. Ebada Sarhan, Atif Ghalwash, Khafagy Mohamed. Queue Weighting Load-Balancing Technique for Database Replication in Dynamic Content Web Sites. *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Applied Computer Science*. 2009. P. 50–55.
12. Sharifiana Saeed, Seyed A. Motamedia, Mohammad K. Akbari. A predictive and probabilistic load-balancing algorithm for clusterbased web servers. *Applied Soft Computing*. 2011. Volume 11. Issue 1. P. 970–981.
13. Lin Zhang, Xiao-ping Li. A content-based dynamic load-balancing algorithm for heterogeneous Web server cluster. *Computer Science and Information Systems*. 2010. Vol.7(1). P. 153–162.
14. Rathore Neeraj. Performance of Hybrid Load Balancing Algorithm in Distributed Web Server System. *Wireless Personal Communications*. 2018. Volume 101. Issue 3. P. 1233–1246.
15. Игнатенко Е.Г., Бессараб В.И., Терепалов В.В. Алгоритм адаптивной балансировки нагрузки в кластерных системах. *Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр.* Київ : ІПМЕ ім. Г.С. Пухова НАН України. 2010. Вип. 58. С. 142–150.
16. Райхлин В. А., Классен Р.К. Моделирование процессов балансировки нагрузки в распределенных СУБД, использующих ресурсы сети RUNNet. *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2015. том 61, № 4. С. 90–100.

#### **ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ТЕКУЩИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

*В статье проанализированы методы статической и динамической балансировки нагрузки вычислительных устройств в условиях, когда эти устройства отличаются своей вычислительной мощностью. Предложен способ динамической балансировки на основе универсального критерия, а именно – минимального времени выполнения всех заданий. В качестве показателя загруженности вычислительного устройства применяются его временные характеристики. Пошаговая последовательность динамической балансировки рассмотрена на примере. Определены перспективы дальнейшего усовершенствования.*

**Ключевые слова:** распределенные вычисления, балансировка нагрузки, динамическая балансировка, оценка загруженности, критерии балансировки, диспетчер загруженности.

#### **DISPATCHING OF DYNAMIC LOAD BALANCING OF COMPUTING DEVICES BASED ON EVALUATING STATE OF CURRENT CALCULATIONS**

*In the article it was investigated methods of static and dynamic load balancing of computing devices in cases when the devices have different computing performance. It was suggested a way of dynamic balancing based on universal criterion, namely – the minimal time of completion of all the tasks. As indicator of loading of computer device, it's used its timing characteristic. It was reviewed a step-by-step sequence of dynamic balancing by using example. Additionally, it was considered possibilities of future improvements.*

**Key words:** distributed computing, load balancing, dynamic balancing, evaluating of loading, criteria of loading, dispatcher of loading.

Повхан І.Ф.

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

## ПОНЯТТЯ ФУНКЦІЇ ТА АЛГЕБРАЇЧНОЇ СХЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ В ЗАДАЧАХ КЛАСИФІКАЦІЇ ДИСКРЕТНИХ ОБ'ЄКТІВ

*Робота присвячена принципам теорії розпізнавання дискретних об'єктів – функції та алгебраїчній схемі розпізнавання. Правильно побудована функція розпізнавання дозволяє забезпечити мінімальну та ефективну схему класифікації, що забезпечує просте та повне розпізнавання дискретних об'єктів.*

**Ключові слова:** розпізнавання дискретних об'єктів, алгебраїчна схема, функція розпізнавання.

**Актуальність.** Під час розв'язку задач класифікації дискретних об'єктів вирішальне значення має якість функції розпізнавання, яка безпосередньо впливає на ефективність та простоту загальної схеми класифікації.

Також слід зауважити, що суттєвим аспектом задачі розпізнавання образів, який безпосередньо впливає як на якість, так і на швидкість класифікації, є вибір ознак в процесі попередньої обробки початкових даних [1]. Другим важливим аспектом є процес побудови основного правила класифікації (схеми), яке базується на використанні даних ознак і забезпечує розв'язок задачі класифікації. Ці два основні аспекти (етапи) довільної задачі розпізнавання дискретних об'єктів знаходять своє відображення в загальній структурній схемі побудови функції розпізнавання.

Зазначимо також, що здебільшого об'єкт в задачах розпізнавання образів представляється як вектор значень деяких ознак, кількість яких може бути дуже великою, а інформативність одних суттєво більша за інших. Зрозуміло, що збільшення кількості ознак значно ускладнює процес побудови схеми класифікації, збільшує витрати, пов'язані зі збереженням даних про образи, та що найгірше, в деяких випадках може привести до зниження точності розпізнавання. У зв'язку з цим виникає важлива задача, яка напряму пов'язана з головною проблемою теорії розпізнавання – задачею вибору з початкових ознак деякої кількості ознак та їх сполучень, найбільш важливих для розв'язання поставленої задачі. Для розв'язання даної проблеми необхідно, по-перше, вміти оцінювати важливість різних ознак та їх сполучень. Важливість ознак визначається найчастіше за даними за допомогою тих чи інших критеріїв важливості [2; 3].

В самому простому випадку, коли навчаюча вибірка представлена у вигляді векторів з відомою функцією розпізнавання для кожного з них, про-

цес класифікації буде представляти лише пошук у вибірці об'єкта, значення ознак якого співпадають зі значеннями ознак об'єкта класифікації (припускаємо лише, що дана вибірка буде адекватно описувати множину класів образів). Але за великого об'єму навчаючої вибірки це призведе до великих витрат часу та пам'яті (причому при надходженні нового об'єкта класифікації все буде повторюватись). Саме представлення вибірки у вигляді дерева дозволить зберегти і час, і пам'ять ЕОМ [4; 5].

**Постановка завдання.** Загальну задачу розпізнавання (класифікації) образів можна сформулювати в наступному спрощеному вигляді. Нехай на деякій множині  $M$  об'єктів  $w$  задане розбиття  $R$  на скінчене число  $m$  підмножин (класів, образів)  $H_i$  ( $i = 0, \dots, m$ ). Відповідні множини  $H_0, H_1, \dots, H_m$  будемо називати образами, а елементи множини  $M$  – зображеннями або представниками образів  $H_0, H_1, \dots, H_m$ . Об'єкти (зображення)  $w$  задаються наборами значень деяких ознак  $x_j, j = 1, \dots, n$ . Якщо  $w \in H_i$ , то будемо рахувати, що даний об'єкт належить образу  $H_i$ . В загальному випадку образи  $H_0, H_1, \dots, H_m$  можуть бути задані імовірнісними розподілами  $p(H_0 / w), p(H_1 / w), \dots, p(H_m / w)$ , де  $p(H_i / w)$  – імовірність (або в неперервному випадку щільність імовірності) належності  $w(w \in M)$  образу  $H_i$ .

Зазвичай в задачах розпізнавання на початку задається деяка апіорна інформація про характер розбиття  $R$  і залежно від характеру даної інформації. Слід зазначити, що фіксований набір ознак, якими характеризується  $w$ , завжди один і той самий для всіх об'єктів, які розглядають під час розв'язання даної задачі. Кожна з ознак може приймати значення з різних множин допустимих значень ознак. Наприклад, дуже часто ознаки приймають значення із множини  $\{0, 1\}$ , або ознака приймає скінчене число значень –  $\{a_1, a_2, \dots, a_d\}$ , значення ознаки може бути функцією розподілу деякої випадкової величини. Об'єкти, які

належать якомусь одному класу, характеризуються певною спільністю своїх ознак, а об'єкти з різних класів такої спільності не мають, отже, розв'язання задачі розпізнавання зводиться до того, щоб якимось чином виділити та описати цю спільність або її відсутність. Під час розпізнавання образів найважливішою, а іноді єдиною заданою інформацією про розбиття, є навчаюча вибірка (НВ):  $(A_1, H_{s,1}), (A_2, H_{s,2}), \dots, (A_z, H_{s,z})$ , де  $A_k$  – певні об'єкти (вектори),  $H_{z,k}$  – номери класів, які містять в собі об'єкти  $A_k$ . Належність об'єкта до того чи іншого класу визначається зазвичай в результаті проведення експериментальних досліджень, в ході яких і формується НВ. Саме на основі неї в задачах з попереднім навчанням будується правило класифікації, а розв'язок полягає у визначенні класу, до якого належить об'єкт, який досліджується. Кожне розбиття  $H_0, H_1, \dots, H_m$  можна реалізувати за допомогою деякої скінчено-значної функції  $f_r(w)$ , аргумент якої приймає значення з множини  $M$ . Наприклад, для розбиття  $H_0, H_1, \dots, H_m$  можливо використати функцію  $f_r(w) = i$ , якщо  $w$  належить  $H_i, i = 0, \dots, m$ . Слід зазначити, що функція  $f_r(w)$ , де  $w \in M$ , визначає своєю чергою деяке розбиття множини  $M$ . Крім того,  $f_r(w)$  тільки тоді всюди визначена на множині  $M$ , коли відповідне розбиття  $R$  є повним. Отже, кожне розбиття  $H_0, H_1, \dots, H_m$  можна задати за допомогою скінчено-значної функції  $f_r(w)$ , і навпаки – кожна скінчено-значна функція  $f_r(w)$  задає деяке розбиття.

В загальному випадку задача розпізнавання (класифікації) образів полягає в побудові функції  $f_r(w)$ , яка реалізує розбиття  $R$  множини  $M$  або розрахунку значень деяких предикатів  $P_i(w)$  (зауважимо, що рішення про належність об'єкта до того чи іншого класу може кодуватися наступним чином:  $0$  ( $w$  не належить  $H_i$ ) та  $1$  ( $w$  належить  $H_i$ )).

Визначимо ознаку деякого об'єкта  $w$  як деяку функцію  $f(w)$ , аргументи якої приймають значення з довільної множини  $G$ , а  $f(w)$  – із скінченної множини  $\{0, 1, \dots, k\}$ . Функція  $f(w)$  може мати як детермінований, так і імовірнісний характер. Довільну функцію  $f(w)$ , визначену на  $G$ , та таку, що приймає скінчене число значень, ми назвали ознакою. Нехай  $L$  – деякий клас ознак на множині  $M$ , а  $K$  – клас схем. Під схемою  $S(f_1, f_2, \dots, f_n)$  з класу  $K$  будемо розуміти оператор, який ознакам  $f_1, f_2, \dots, f_n$  з  $L$  ставить у відповідність деяку (скінчено-значну) функцію  $\phi(x) = S(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ , визначену на множині  $M$  [5; 6]. В якості елементарних ознак можуть виступати предикати, тобто детерміновані ознаки, які приймають значення  $0$  або  $1$ .

Від них будемо вимагати, щоб вони в деякому розумінні були найпростішими (були описом фіксованого образу). Ознаку, яку можна отримати деяким способом з елементарних ознак  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n$ , назовемо узагальненою ознакою.

Поняття схеми розпізнавання дискретних об'єктів. Одним з важливих понять теорії програмування та теорії алгоритмів є поняття алгоритмічної схеми розпізнавання. Нехай задана деяка множина  $G$ . Позначимо через  $E(G)$  множину всіх одномісних операцій на  $G$ , а через  $R(G)$  множину всіх одномісних  $k$  – значних предикатів на  $G$ , ( $k \geq 2$ ). Введемо ще множину  $Z(G) = E(G) \cup R(G)$ .

$(G, n, m)$  – набором називається скінчена подвійна послідовність вигляду

$$f_1, f_2, \dots, f_n; p_1, p_2, \dots, p_m, \quad (0 \leq n < \infty; 0 \leq m < \infty),$$

$$\text{де } f_i \in E(G) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad p_j \in R(G) \quad (j = 1, 2, \dots, m).$$

$F(n, m)$  – схемою називається правило, яке ставить у відповідність кожному  $(G, n, m)$  – набору деяку операцію з  $E(G)$ .  $P(n, m)$  – схемою називається правило, яке ставить у відповідність кожному  $(G, n, m)$  – набору деякий предикат з  $R(G)$ .

$F(n, m)$  та  $P(n, m)$  – схеми будемо називати схемами.

Схема називається алгоритмічною, якщо вказане вище правило є конструктивним. Слід зазначити, що приведені вище визначення схеми є більш загальним. Схеми програм, логічні схеми алгоритмів, комбінаційні скінчені автомати є схемами в визначеному вище сенсі.

В даній роботі розглядаються алгоритмічні схеми над ознаками, які використовуються для опису об'єктів під час розпізнавання. Крім того, досліджується зв'язок між алгоритмічними схемами розпізнавання, з одного боку, та скінченими розбиттями і скінченими алгебрами, з іншого.

Нехай  $G$  – деяка множина. Ознакою будемо називати  $k$  – значний предикат, заданий на  $G$ . Всякий  $k$  – значний предикат, заданий на  $G$ , задає деяке розбиття  $R$  множини  $G$  на  $k$  класів:

$$R: G_0, G_1, \dots, G_{k-1} \text{ а саме:}$$

$$(x \in G \text{ and } p(x) = i) \Leftrightarrow (x \in G_i); \quad (i = 0, 1, 2, \dots, k-1),$$

$$\text{причому } G_i \cap G_j = \emptyset, \quad (i \neq j) \text{ та } \bigcup_{i=0}^{k-1} G_i = G.$$

Нехай  $p_1$  та  $p_2$  – два  $k$  – значні предикати, які задані на  $G$ . Визначимо на  $G$  наступні предикати:

$$p = p_1 \wedge p_2 = \min(p_1, p_2); \quad (1)$$

$$p = p_1 \vee p_2 = \max(p_1, p_2); \quad (2)$$

$$p = \overline{p_1} = (k-1) - p_1; \quad (3)$$

$$\phi_i(p_1) = \begin{cases} k-1, & \text{if } p_1 = i \\ 0, & \text{if } p_1 \neq i \end{cases}. \quad (4)$$

Зауважимо, що тут ( $i = 0, 1, 2, \dots, k-1$ ). Предикати  $\phi_i(p_1)$  називаються характеристичними пред-

икатами. Очевидно, що предикати, які задані за допомогою схем (1–4) також є ознаками в визначеному вище сенсі.

З’ясуємо, яким чином пов’язане розбиття множини  $G$ , яке задане схемами (1–4), з розбиттями, які задаються предикатами  $p_1$  та  $p_2$ .

Нехай  $p_1, p_2$  та  $p$  визначають розбиття  $R_1, R_2$  та  $R$  множини  $G$ , відповідно, на класи:

$$R_1 : G_0^1, G_1^1, G_2^1, \dots, G_{k-1}^1; \quad R_2 : G_0^2, G_1^2, G_2^2, \dots, G_{k-1}^2;$$

$$R : G_0, G_1, G_2, \dots, G_{k-1};$$

Тоді схема (1) задає розбиття:

$$R : G_i = \left( \bigcup_{j=0}^i (G_j^1 \cap G_j^2) \right) \cup \left( \bigcup_{l=0}^i (G_l^1 \cap G_l^2) \right); \quad (5)$$

Зауважимо, тут  $(i = 1, 2, 3, \dots, k - 1)$ . Схема (2) задає розбиття:

$$R : G_i = \left( \bigcup_{j=i}^{k-1} (G_j^1 \cap G_j^2) \right) \cup \left( \bigcup_{l=0}^i (G_l^1 \cap G_l^2) \right); \quad (6)$$

Зауважимо, тут  $(i = 1, 2, 3, \dots, k - 1)$ . Схема (3) задає розбиття

$$R : G_i = G_{k-1-i}^1; \quad (7)$$

Зауважимо, тут  $(i = 1, 2, 3, \dots, k - 1)$ . Схема (4) задає розбиття

$$R : G_0 = G \setminus G_1^1; G_{k-1} = G_1^1; G_j = \emptyset; \quad (8)$$

Зауважимо, тут  $(j = 1, 2, 3, \dots, k - 2)$ . Позначимо через  $\cup G_p$  множини, елементами якого є класи  $G_i, (i = 0, 1, 2, \dots, k - 1)$ , розбиття, яке визначається предикатом  $p$ .

Таким чином, якщо задача розпізнавання полягає в тому, щоб розділити множини  $G$  на  $k$  класів, що не перетинаються  $G_0, G_1, \dots, G_{k-1}$ , причому з номером класу  $G_i, (i = 0, 1, 2, \dots, k - 1)$  не зв’язуємо ніяких властивостей, то можна рахувати, що предикати  $p$  та  $\bar{p}$  задають одне й те саме розбиття.

Схеми (1–4) мають наступні властивості:

- 1)  $p_1 \vee p_2 = p_2 \vee p_1$ ;
- 2)  $p_1 \vee (p_2 \vee p_3) = (p_1 \vee p_2) \vee p_3$ ;
- 3)  $p_1 \& p_2 = p_2 \& p_1$ ;
- 4)  $p_1 \& (p_2 \& p_3) = (p_1 \& p_2) \& p_3$ ;
- 5)  $p_1 \vee (p_2 \& p_3) = (p_1 \vee p_2) \& (p_1 \vee p_3)$ ;
- 6)  $p_1 \& (p_2 \vee p_3) = (p_1 \& p_2) \vee (p_1 \& p_3)$ ;
- 7)  $\overline{p_1 \vee p_2} = \bar{p}_1 \& \bar{p}_2$ ;
- 8)  $\overline{p_1 \& p_2} = p_1 \vee p_2$ ;
- 9)  $0 \vee p = p$ ;
- 10)  $(k - 1) \vee p = k - 1$ ;
- 11)  $0 \& p = 0$ ;
- 12)  $(k - 1) \& p = p$ ;
- 13)  $p_1 \vee p_2 = p_1 \Leftrightarrow G_i^1 \subset \bigcup_{j=i}^{k-1} G_j^2, (i = 0, 1, \dots, k - 1)$ ;
- 14)  $p_1 \wedge p_2 = p_2 \Leftrightarrow G_i^1 \subset \bigcup_{j=i}^{k-1} G_j^2, (i = 0, 1, \dots, k - 1)$ ;

Зауважимо, що властивості (1–12) відомі для функцій булевої алгебри.

Під час розпізнавання дискретних об’єктів доводиться зазвичай враховувати значення не

однієї якоїсь ознаки, а декількох ознак. Крім того, здебільшого вказані ознаки та ознаки, які задають відповідне розбиття множини  $G$ , не співпадають за значністю. Тоді розбиття множини  $G$ , яке ми шукаємо, задається  $k$ -значним предикатом на  $G$ , який представляється у вигляді деякої схеми над предикатами  $p_1, p_2, \dots, p_m$  на  $G$ , які мають відповідні значності  $k_1, k_2, \dots, k_m$  де  $p_1, p_2, \dots, p_m$  – ознаки, які враховуються під час класифікації (розпізнавання) елементів множини  $G$ .

Зауважимо, що вказана схема – це деяка  $P(o, m)$  схема, яка представляє собою відображення  $(G, o, m)$  – набору  $p_1, p_2, \dots, p_m$  на множини  $E^k, (E^k = \{0, 1, \dots, k - 1\})$ .

Вказані схеми можуть бути представлені у вигляді ДНФ багатозначних логічних функцій в системі Россера-Тьюкетта, причому характеристичні функції мають вигляд:

$$\phi_j(p_i) = \begin{cases} k_i & \text{if } p_i = j \\ 0 & \text{if } p_i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

Зауважимо, що тут  $(j \in \{0, 1, \dots, k_i\}), (i \in \{1, 2, \dots, m\})$ .

Розглянемо приклад. Нехай на  $G$  задані наступні ознаки:

$p_1$ , задає розбиття  $R_1 : G_0^1, G_1^1$ ;

$p_2$ , задає розбиття  $R_2 : G_0^2, G_1^2, G_2^2$ ;

Нехай розбиття  $R$  задається предикатом  $p$ , який залежить від ознак  $p_1, p_2$  та представлений в табличній формі:

Таблиця 1

Представлення предикату  $p$  в табличній формі

$p$	0	2	1	0	2	3
$p_1$	0	0	0	1	1	1
$p_2$	0	1	2	0	1	2

Визначимо наступні предикати (характеристичні):

$$\phi_j(p_j) = \begin{cases} 3 & \text{if } p_j = i \\ 0 & \text{if } p_j \neq i \end{cases}$$

Зауважимо, що тут  $(j \in \{1, 2\}), (i \in \{0, 1, 2\})$ .

Тоді будемо мати наступне представлення:

$$p = 1\phi_0(p_1)\phi_2(p_2) \vee 2(\phi_0(p_1)\phi_1(p_2)) \vee \phi_1(p_1)\phi_1(p_2) \vee 3\phi_1(p_1)\phi_2(p_2). \quad (10)$$

В графічній формі його можна задати наступним чином (Рис. 1):

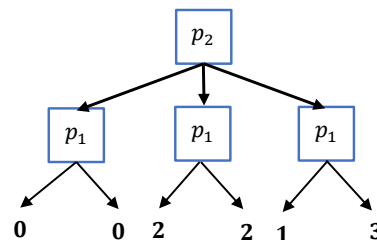


Рис. 1. Представлення предикату  $p$  у вигляді логічного дерева

Використовуючи алгоритми мінімізації дерева класифікації, отримаємо наступне мінімальне дерево (Рис. 2).

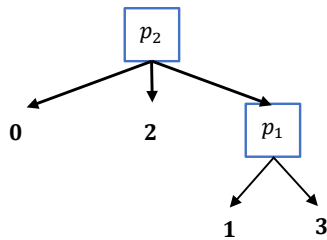


Рис. 2. Мінімізоване логічне дерево предикату  $p$

Даний предикат, записаний в аналітичній формі, буде мати наступний вигляд:

$$p = 2\phi_1(p_2) \vee 1\phi_0(p_1)\phi_2(p_2) \vee 3\phi_1(p_1)\phi_2(p_2) \quad (11)$$

Таким чином, використовуючи відомі методи мінімізації  $k$  – значних логічних функцій, можна значно спростити схеми, які задають предикати розпізнавання.

Враховуючи формули (5–8), легко помітити, що формула  $\phi_i(p_i) * \phi_l(p_m)$  задає наступне розбиття множини  $G$ :

$$R: G_{k-1} = G_l^j \cap G_l^m; G_0 = G \setminus G_{k-1}; G_s = \emptyset$$

Зауважимо, тут

$$(s \in \{1, 2, \dots, k-2\}; i, l \in \{0, 1, \dots, k-1\}).$$

Отже предикат, який задається формулою (11), задає фактично розбиття:

$$R: G_0 = G_0^2; G_1 = G_0^1 \cap G_2^2; G_2 = G_1^2; G_3 = G_1^1 \cap G_2^2;$$

Під час розпізнавання образів часто виникає ситуація, коли не для всіх  $x, (x \in G)$  відомі значення всіх ознак та, відповідно, для деяких  $x$  ми не можемо розрахувати значення предиката  $p(x)$ , який задає дане розбиття множини  $G$ . В цьому випадку значення даного предиката  $p(x)$  треба розраховувати, виходячи з тих ознак, значення яких відомі, використовуючи наприклад початкові відомості щодо важливості дискретних ознак [6].

Може бути випадок, коли значення всіх ознак відомі, але не відомо значення предикату  $p(x)$ . При цьому для розрахунку значення предикату  $p(x)$  доцільно застосувати методи розпізнавання дискретних об'єктів (наприклад тестові методи та інше).

**Алгебра розбиття.** Непуста родина  $S$  множин називається алгеброю, якщо з:

$$A_1 \in S, A_2 \in S \Rightarrow (A_1 \cup A_2) \in S, (A_1 \cap A_2) \in S, \bar{A}_1 \in S$$

Ми будемо розглядати алгебру  $S$  на деякій множині  $G$ , тобто всі множини родини  $S$  будемо рахувати підмножинами множини  $G$ .

Оскільки  $A \cap \bar{A} = \emptyset$  та  $A \cup \bar{A} = G$ , то множина  $\emptyset$  та  $G$  належить довільній алгебрі  $S$ .

Очевидно, що перетин алгебр є також алгеброю.

Нехай  $B$  – деяка родина множин. Через  $S(B)$  позначимо перетин всіх алгебр, які містяться в родині  $B$ . Зрозуміло, що  $S(B)$  є мінімальною алгеброю, яка містить родину  $B$ . Родина  $B$  називається базисом алгебри  $S_1$ , якщо  $S_1 = S(B)$ .

Нехай  $R$  – скінчене розбиття множини  $G$  (розглядати в цій роботі будемо лише скінчені розбиття). Алгебра  $S_1$  називається алгеброю розбиття, якщо деяке розбиття  $R$  є базисом даної алгебри, тобто якщо  $S_1 = S(B)$ .

**Теорема 1** Нехай  $R$  – скінчене розбиття множини  $G$ . Тоді всі елементи алгебри  $S_1$  є об'єднанням скінченного числа елементів розбиття  $R$ .

**Доведення.** Нехай  $R: A_1, A_2, \dots, A_k$ . Очевидно, що

$$\bar{A}_i = \left( \bigcup_{j=1}^{i-1} A_j \right) \cup \left( \bigcup_{l=i+1}^k A_l \right) \quad (12)$$

Тобто  $\bar{A}_i$  дорівнює об'єднанню скінченного числа елементів розбиття  $R$ , де  $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ .

Очевидна також наступна рівність:

$$\overline{A_{i_1} \cup A_{i_2} \cup \dots \cup A_{i_m}} = A_{j_1} \cup A_{j_2} \cup \dots \cup A_{j_{k-m}} \quad (13)$$

Зауважимо, що тут

$$\{j_1, j_2, \dots, j_{k-m}\} = \{1, 2, \dots, k\} \setminus \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$$

З визначення алгебри розбиття слідує, що всі елементи представляються через елементи розбиття  $R$  за допомогою операцій  $\cup$  та  $\cap$

Використовуючи правило де Моргана

$$B_1 \cap B_2 = \overline{B_1 \cup B_2}, (B_1, B_2 \in S_i) \quad (14)$$

Довільний елемент алгебри  $S_1$  можна звести до виразу, який не містить операцію перетину.

Таким чином, застосовуючи формули (14), (12), (13) (у вказаному порядку), любий елемент алгебри  $S_1$  можна представити у вигляді об'єднання елементів розбиття  $R$ . Отже теорема доведена.

Алгебра  $S$  називається скінченною, якщо кількість її елементів скінченна.

Враховуючи той факт, що кількість різних об'єднань скінченної родини множин скінченно, та теорему 1, отримаємо:

**Наслідок 1.** Всяка алгебра розбиття  $R$  є скінченною алгеброю.

**Теорема 2** Всяка скінченна  $S_k$  алгебра є алгеброю розбиття.

**Доведення:** Нехай  $A_1, A_2, \dots, A_n$  – деякий базис алгебри  $S_k$ . Утворимо наступні множини:

$$K_{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n} = A_1^{\alpha_1} \cap A_2^{\alpha_2} \cap \dots \cap A_n^{\alpha_n}.$$

Зауважимо, що тут  $\alpha_i \in \{0, 1\}; A_i^0 = \bar{A}_i; A_i^1 = A_i, (i = 1, 2, \dots, n)$ .

Позначимо родину множин  $K_{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n}$ , через  $R$ . Родина  $R$  є розбиттям множини  $G$ .

Дійсно, якщо  $x \in G$ , то знайдуться такі  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ , що  $x \in A_i^{\beta_i}$ . Отже  $x \in K_{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n}$ . З іншого

боку, різні множини родини  $R$  не містять однакових елементів. Тепер покажемо, що  $S(R) = S_k$ . Для цього достатньо показати, що  $S(R)$  містить базис алгебри  $S_k$ . Але це слідує з того очевидного факту, що:  $A_i = \cup K_{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{i-1}, 1, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_n}$ .

Зауважимо, що тут

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{i-1}, \alpha_{i+1}, \dots, \alpha_n \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n.$$

Таким чином, вивчення скінчених розбиттів можна звести до вивчення скінчених алгебр.

Нехай деякий предикат  $p$ , який задає розбиття множини на  $R$  класів, задає деяку схему, яка представляється у вигляді ДНФ від ознак  $p_i$ ,  $(i = 1, 2, \dots, n)$ , де ознаки  $p_i$  мають значність  $k_j$ . Для визначеності будемо рахувати, що  $k_j \mid k_n$ ,  $(j = 1, 2, \dots, n - 1)$ . Тоді кожному набору  $\alpha$  предикатів можна однозначно поставити у відповідність його  $k_n$  – вий код. В подальшому вказані набори ознак будуть узагальнювати з їх  $k_n$  – вим кодом.

Позначимо перетин  $G_i^{p_1} \cap G_i^{p_2} \cap \dots \cap G_i^{p_n}$  через  $\cap \alpha$ , де  $\alpha$  –  $k_n$  – вий код набору  $p_1^{i_1} p_2^{i_2} \dots p_n^{i_n}$ ,  $(i_j \in \{0, 1, \dots, k_j\}; j = 1, 2, \dots, n)$ .

Наступна теорема дає зв'язок між базами розбиттів алгебр, які визначені ознаками  $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , та базисом розбиття алгебр, які визначені предикатом  $p$ .

**Теорема 3.** Нехай предикат  $p$  задає розбиття  $R: G_0, G_1, \dots, G_{k-1}$ , приймає значення  $m$  на наборах  $\alpha_1^m, \alpha_2^m, \dots, \alpha_r^m$  і тільки на них

$$(m \in \{0, 1, \dots, k - 1\})(r \leq k_1 * k_2 * \dots * k_n).$$

Тоді об'єднання виду  $\bigcup_{j=1}^r (\cap \alpha_j^m)$ , і тільки тоді вони є компонентами розбиття фіксованого предикату  $p$ .

**Доведення.** Дійсно, нехай деякий елемент  $x$  множини  $G$  належить перетину  $\cap \alpha_j^m; (j \in \{1, 2, \dots, r\})$ , де  $m \in \{0, 1, \dots, k - 1\}$ . Тоді очевидно,  $x \in G_m$  для всіх  $j \in \{1, 2, \dots, r\}$ . Таким чином,  $\bigcup_{j=1}^r (\cap \alpha_j^m) \subset G_m$ .

Покажемо, що  $\bigcup_{j=1}^r (\cap \alpha_j^m) \supset G_m$ .

Дійсно, нехай  $x_1 \in G_m$ . Це означає, що значення ознак  $p_1, p_2, \dots, p_n$  при  $x_1$  визначає такий набір  $\alpha$ , що  $p(\alpha) = m$ . Отже,  $\alpha \in \{\alpha_1^m, \alpha_2^m, \dots, \alpha_r^m\}$  тобто  $x_1 \in \bigcup_{j=1}^r (\cap \alpha_j^m)$ .

Теорема доведена.

**Висновки.** Отже, в роботі були розглянуті базові поняття теорії розпізнавання дискретних об'єктів – функції та загальні схеми розпізнавання. Також введено поняття узагальненої ознаки, причому в її якості можуть виступати автономні алгоритми класифікації довільної структури.

Також слід зазначити, що, як показано в даній роботі, між схемами розпізнавання, скінченими розбиттями та скінченими алгебрами існує безпосередній зв'язок, що дозволяє під час вивчення схем розпізнавання та скінчених розбиттів використовувати апарат скінчених алгебр. Дане дослідження актуальне для всіх методів класифікації дискретних об'єктів.

### Список літератури:

1. Повхан І.Ф. Визначення поняття ознаки в теорії розпізнавання образів. *Науково технічний журнал «Штучний Інтелект»*, 2002, № 4, С. 512–517.
2. Повхан І.Ф. Групова та індивідуальна оцінка важливості бульових аргументів. *Вісник національного технічного університету «ХПИ»*, 2011, № 53, С. 57–64.
3. Повхан І.Ф., Василенко Ю.А., Василенко Е.Ю. Концептуальна основа систем розпізнавання образів на основі метода розгалуженого вибору ознак. *Науково технічний журнал “European Journal of Enterprise Technologies”*, 2004, № 7[1], С. 13–15.
4. Повхан І.Ф., Василенко Е.Ю., Василенко Ю.А. Метод розгалуженого вибору ознак в математичному конструюванні багаторівневих систем розпізнавання образів. *Науково технічний журнал «Штучний Інтелект»*, 2003, № 7, С. 246–249.
5. Povhan I. General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition discrete objects. *Збірник наукових праць «Електроніка та інформаційні технології»*, Львів, 2019. Випуск 11. С. 112–117.
6. Повхан І.Ф. Проблема функціональної оцінки навчальної вибірки в задачах розпізнавання дискретних об'єктів. *Вчені записки Таврійського національного університету. Серія: технічні науки*. 2018. Том 29(68) № 6 2018. С. 217–222.

### ПОНЯТИЕ ФУНКЦИИ И АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ В ЗАДАЧАХ КЛАССИФИКАЦИИ ДИСКРЕТНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Работа посвящена принципиальным понятиям теории распознавания дискретных объектов – функции и алгебраической схеме распознавания. Правильно построенная функция распознавания позволяет обеспечить минимальную и эффективную схему классификации, что обеспечивает простое и полное распознавание дискретных объектов.*

**Ключевые слова:** распознавание дискретных объектов, алгебраическая схема, функция распознавания.

**THE CONCEPT OF FUNCTION AND ALGEBRAIC RECOGNITION SCHEME  
IN CLASSIFICATION PROBLEMS OF DISCRETE OBJECTS**

*The work is devoted to the basic concept of the theory of recognition of discrete objects – functions and algebraic recognition scheme. Properly constructed recognition function allows to provide a minimum and effective classification scheme that provides a simple and complete recognition of discrete objects.*

**Key words:** *discrete object recognition, algebraic scheme, recognition function.*



*Погромська Г.С.*

Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського

## ЗАСТОСУВАННЯ ВАЛІДАТОРІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ SQL-ІН'ЄКЦІЙ ДО БАЗ ДАНИХ

*У статті дано опис розробленого програмного забезпечення для реалізації методів SQL-ін'єкцій з метою використання в навчальних цілях. Моделюються випадки реалізації SQL-вставок, виділяються їх особливості для розуміння механізмів роботи. Наведено особливості реалізації моделі дослідження SQL-ін'єкцій за допомогою валідаторів. Розглянуто роботу моделі для дослідження ін'єкцій SQL. У моделі реалізована можливість перегляду результату ін'єкції у разі захищеної та незахищеної від SQL ін'єкцій бази даних.*

**Ключові слова:** база даних, SQL ін'єкція (SQL Injection), програмне забезпечення, захист даних, атака.

**Постановка проблеми.** SQL-ін'єкції є одним з найбільш поширених загроз інформаційній безпеці завдяки своїй простоті. Атака типу SQL-Injection – це атака, за якої проводиться вставка шкідливого коду в рядки, що передаються потім в екземпляр системи управління базою даних (СУБД) для синтаксичного аналізу і виконання. Будь-яка процедура, яка створює інструкції SQL, повинна розглядатися на предмет уразливості до вставки небезпечного коду, оскільки СУБД виконує всі одержувані синтаксично правильні запити. Навіть параметризовані дані можуть стати предметом маніпуляцій досвідченого зловмисника. Вивчення основних відомостей про атаки типу SQL-Injection та загальних принципів захисту від SQL Injection є невід'ємним складником дисциплін у ЗВО, пов'язаних з реалізацією та експлуатацією баз даних. Тому проведення аналізу кода, котрий містить вразливість, демонстрація основних прийомів захисту від атак SQL-Injection у межах відповідних навчальних курсів ЗВО потребує практичної спрямованості та засобів унаочнення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Базову інформацію по атакам типу SQL-Injection зустрічаємо в роботі [7], в якій пропонуються механізми та способи попередження атак типу SQL-Injection. Серед інших питань розглядається ін'єкція підзапитів в запиті Insert. У роботах автора Т. Макарова [1] описано основні техніки SQL-Injection та специфічні особливості MySQL. Авторами О. Маор та Е. Шулман у [4] розглядаються методи здійснення SQL-Injection в умовах, коли немає будь-якої інформації про додаток, тип бази даних, структури таблиці тощо, відсутні повідомлення про помилки, а у роботі [5] розгляда-

ються методи обходу сигнатурного захисту, націлених на попередження атак SQL-Injection. Робота [6] присвячена не тільки методам здійснення атаки, але приділяє увагу процесу дослідження уразливого додатка. Інформативною з точки зору атаки на систему є стаття автора Ц. Церрудо [3], в якій розглядаються атаки на системи, що застосовують в якості бекенд-сервера MS SQL-Server, зокрема, як за допомогою SQL-Injection проникнути за міжмережевий екран у внутрішню мережу (отримання доступу через SQL-Injection до інших джерел даних, витягування бази користувачів MS SQL, засоби з захисту SQL-Server тощо). У статті [2] розглянуто важливий метод здійснення атаки SQL-Injection у випадках, коли немає виведення повідомлень про помилки, неможливо використати Union Select, відсутня інформація про структуру бази, зокрема, функції MySQL, корисні при здійсненні SQL-Injection, посимвольний перебір значень будь-яких даних з бази даних, використання підзапитів тощо. Отже, SQL Injection – це серйозна помилка в програмуванні, широко розповсюджена та вкрай небезпечна. Правильно побудований процес Software Development Life Cycle значною мірою знижує ймовірність появи вразливості у коді. Тому захист додатків, також як і інформаційна безпека в цілому, повинні бути комплексним, а їх вивченню слід приділяти належну увагу в межах відповідних навчальних курсів ЗВО.

**Постановка завдання.** Метою статті є описати розроблений програмний засіб для реалізації різних методів SQL-ін'єкцій з метою використання в навчальних цілях для моделювання випадків реалізації SQL-вставок, виділення їх особливостей, розуміння механізмів роботи.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Програмне забезпечення (ПЗ) «Моделювання атак типу SQL-ін'єкцій до баз даних» – модель, що дозволяє наочно оцінити методи і способи захисту баз даних від найбільш поширеної загрози їх інформаційній безпеці – атак типу SQL Injection.

Програмне забезпечення наочно показує можливості злому бази даних за методом SQL-ін'єкцій (SQL-Injection), що реалізоване за допомогою валідаторів. У програмному забезпеченні використовується база даних (БД), що складається з декількох таблиць, одна з яких є загальнодоступною, одна – приватною, і третя, до якої користувач може отримати доступ (рис. 1).

Як засіб розробки було обране середовище розробки Embarcadero RAD Studio 10 Seattle та СУБД MySQL.

Реалізовані функції:

- можливість перегляду результату ін'єкції за незахищеної бази даних;
- реакція на запит захищеної і незахищеної від SQL-ін'єкцій БД у разі реалізації однієї і тієї ж ін'єкції;
- під час демонстрації використовується SQL-запит з об'єднанням рядків публічної і приватної таблиці, що дозволяє отримати список користувачів з таблиці user, який зазвичай є прихованим;
- демонстрація реакції захищеної системи у відповідь на запит з SQL-ін'єкцією (видається помилка) тощо.

Розглянемо особливості реалізації моделі дослідження SQL-ін'єкцій за допомогою валідаторів. Для захисту системи від можливості виконання SQL-ін'єкцій необхідний попередній аналіз значень параметрів, що надходять від користувача (строкових параметрів). Не можна безпосередньо використовувати значення параметрів в SQL-запитах. Було прийнято рішення розробити ряд класів, які виконують валідацію. Розроблено три валідатора (рис. 2):

- валідатор строкових значень «TStringValidator»;
- валідатор цілочисельних значень «TIntValidator»;
- валідатор значень з плаваючою точкою «TFloatValidator».

З діаграми класів слідує, що всі три валідатора успадковують свою поведінку від класу «TCustomValidator». У нашій архітектурі даний клас є «батьком» для всіх валідаторів і концентрує в собі базові функції для здійснення валідації. Клас «TCustomValidator» визначає не тільки базовий метод, який буде виконувати перевірку введених параметрів, але і механізм оповіщення про негативні результати валідації (властивість «UseException» типу «Boolean» визначає, чи буде використаний механізм винятків, або ж буде використаний «тихий режим», функція «RaiseException» – генерує або не генерує виключення залежно від значення властивості «UseException»).

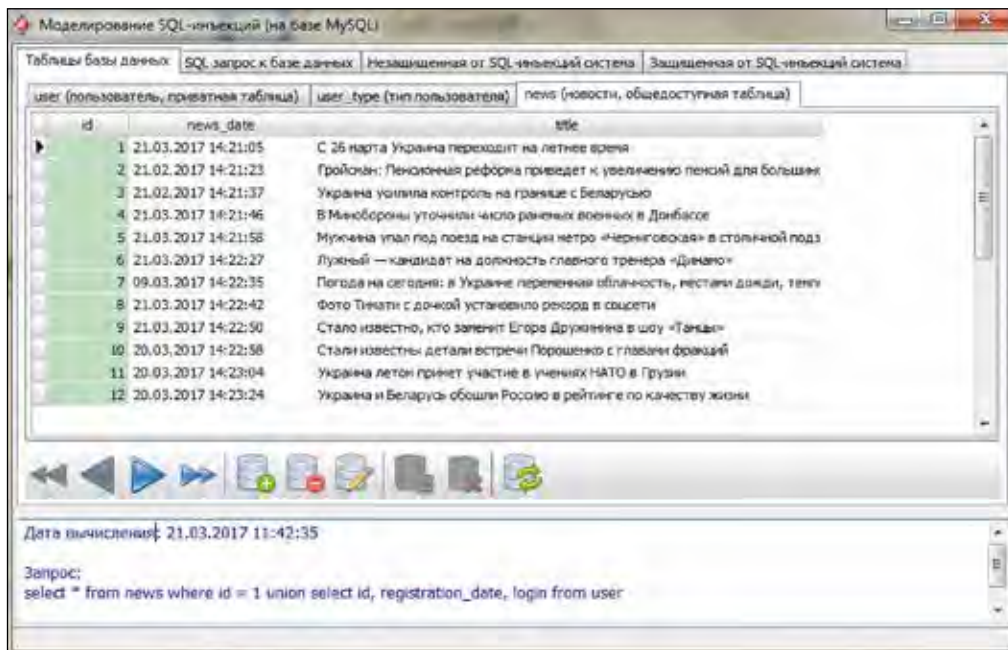


Рис. 1. Таблиці програмного засобу

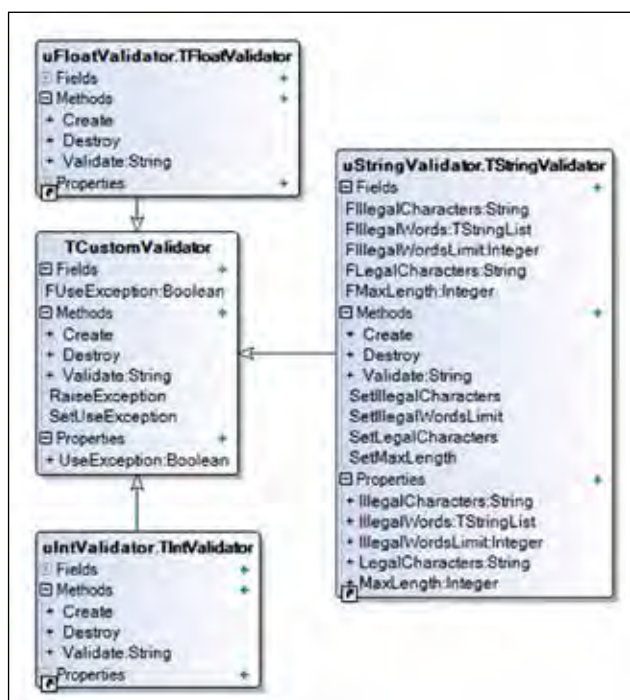


Рис. 2. Діаграма класів

Клас «TStringValidator» слугує для аналізу строкових параметрів і концентрує в собі такі принципи боротьби з SQL-ін'єкціями: фільтрація параметрів, відсікання параметрів, фільтрація зарезервованих слів. Цей клас реалізує в собі можливості для запобігання всіх видів SQL-ін'єкцій через рядкові змінні (використання UNION, екранування хвоста запиту, розщеплення SQL-запиту тощо).

Принцип валідації строкових значень, реалізований в даному класі, ґрунтується на використанні трьох наборів:

- набір дозволених символів (властивість «LegalCharacters»);
- набір заборонених символів (властивість «IllegalCharacters»);
- набір заборонених слів (властивість «IllegalWords»).

Дані властивості будуть визначені програмістом в процесі використання валідатора, тому що для різних СУБД існують свої особливості синтаксису. У разі, якщо якийсь набір не було наведено, то відповідна перевірка просто не буде виконуватися.

Процедуру валідації строкового параметра можна розділити на наступні етапи:

1. Перевірка довжини рядка (обмеження розміру рядка визначається властивістю «MaxLength»);

2. Перевірка наявності неприпустимих символів за розділами дозволених і заборонених символів

(визначається властивостями «LegalCharacters» і «IllegalCharacters» відповідно);

3. Перевірка наявності заборонених слів (властивість «IllegalWords» визначає перелік зарезервованих слів, а властивість «IllegalWordsLimit» визначає їх гранично-допустиму кількість в аналізованому рядку).

Валідатор цілочисельних значень «TIntValidator» (як і «TFloatValidator») влаштований значно простіше свого аналога «TStringValidator». Це пояснюється тим, що під час виконання валідації цілого числа (або числа з плаваючою точкою) перевіряється лише можливість його перетворення. Ніяких додаткових обчислень, крім виконання спроби перетворення строкового значення, не проводиться.

Приклад використання строкового валідатора:

```
// Визначення валідатора
StringValidator : TStringValidator;
```

```
...
// Ініціалізація валідатора
StringValidator := TStringValidator.Create;
// Визначення набору заборонених символів
StringValidator.IllegalCharacters := '\\;*()[]"=-%'+ Char(39);
// Визначення припустимої кількості заборонених слів
StringValidator.IllegalWordsLimit := 0;
// Визначення набору заборонених (зарезервованих) слів
StringValidator.IllegalWords.Add('or');
StringValidator.IllegalWords.Add('and');
StringValidator.IllegalWords.Add('select');
StringValidator.IllegalWords.Add('union');
StringValidator.IllegalWords.Add('from');
StringValidator.IllegalWords.Add('where');
StringValidator.IllegalWords.Add('insert');
StringValidator.IllegalWords.Add('delete');
StringValidator.IllegalWords.Add('update');
...
// Використання валідатора
StringValidator.Validate (Text);
```

Приклад використання цілочисельного валідатора:

```
IntValidator : TIntValidator;
...
IntValidator := TIntValidator.Create;
...
IntValidator.Validate (Text);
```

Приклад використання валідатора значень з плаваючою точкою:

```
...
```

```
FloatValidator : TFloatValidator;
...
FloatValidator := TIntValidator.Create;
...
FloatValidator.Validate (Text);
```

Клас «TCustomValidator» – базовий клас для реалізації будь-яких валідаторів:

Field Summary: internal Boolean (FUseException – використовувати механізм виключень для повідомлення про некоректні значення).

Property Summary: public Boolean (UseException – використовувати механізм виключень для повідомлення про некоректні значення).

Constructor Summary: Create() (конструктор класу).

Method Summary: public Sub (Destroy() – деструктор класу); protected internal Sub (RaiseException(Msg: string) – процедура створення виключень); internal Sub (SetUseException(Value: Boolean) – метод встановлення властивості UseException); public function String (Validate(Value: String) – метод валідації).

Клас «TStringValidator» – валідатор строкових параметрів для SQL-запитів.

Field Summary: internal String (FIllegalCharacters – заборонені символи); internal TStringList (FIllegalWords – заборонені слова); internal Integer (FIllegalWordsLimit – ліміт заборонених слів під час їх підрахунку); internal String (FLegalCharacters – дозволені символи); internal Integer (FMaxLength – обмеження довжини рядка).

Property Summary: public String (IllegalCharacters – заборонені символи); public TStringList (IllegalWords – заборонені слова); public Integer (IllegalWordsLimit – ліміт заборонених слів під час їх підрахунку); public String (LegalCharacters

– дозволені символи); public Integer (MaxLength – обмеження довжини рядка).

Constructor Summary: Create() – конструктор класа.

Method Summary: public Sub (Destroy() – деструктор класа); internal Sub (SetIllegalCharacters(Value: String) – метод визначення заборонених символів); internal Sub (SetIllegalWordsLimit(Value: Integer) – ліміт заборонених слів під час їх підрахунку); internal Sub (SetLegalCharacters (Value: String) – встановити дозволені символи); internal Sub (SetMaxLength (Value: Integer) – встановити обмеження довжини рядка); public function String (Validate(Value: String) – метод валідації).

Клас «TIntValidator» – валідатор цілочисельних значень для SQL-запитів.

Constructor Summary: Create() – конструктор класу.

Method Summary: public Sub (Destroy() – деструктор класу); public function String (Validate(Value: String) – метод валідації).

Клас «TFloatValidator» – валідатор значень з плаваючою точкою SQL-запитів.

Constructor Summary: Create() – конструктор класу.

Method Summary: public Sub (Destroy () – деструктор класу); public function String (Validate(Value: String) – метод валідації).

Розглянемо більш детально роботу моделі для дослідження SQL-ін'єкцій. Як зазначалося вище, у моделі реалізована можливість перегляду результату ін'єкції за незахищеної бази даних. При цьому в разі реалізації однієї і тієї ж ін'єкції можна бачити, як реагує на запит захищена база даних і незахищена від SQL-ін'єкцій база даних (рис. 3).

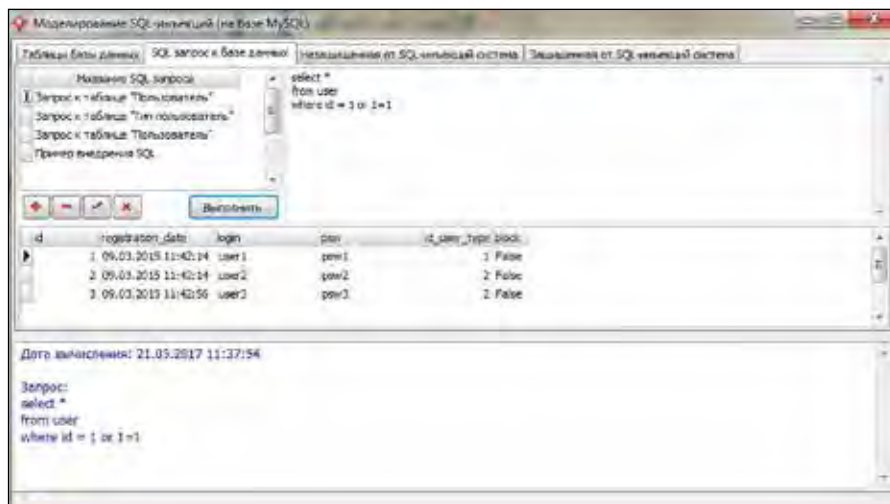


Рис. 3. SQL-запити

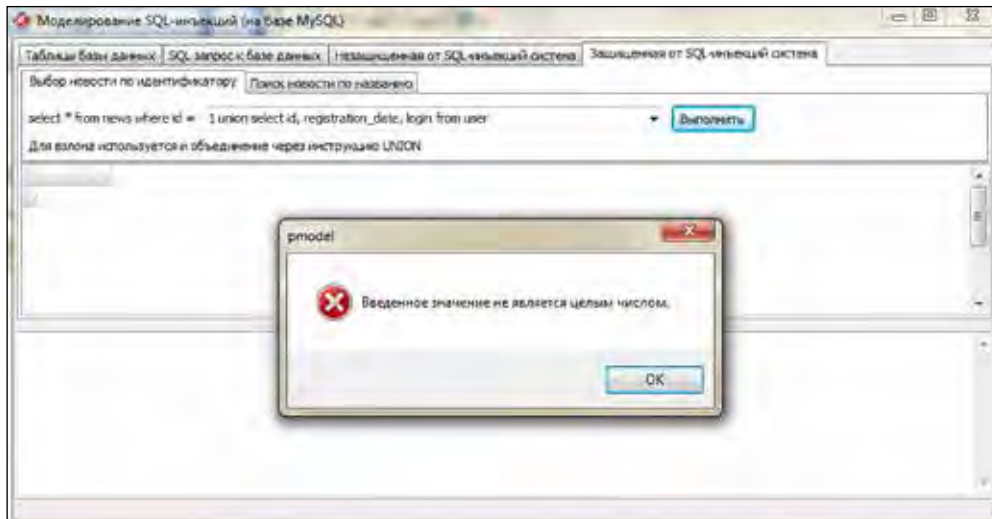


Рис. 4. Результат ін'єкції до захищеної системи

Є можливість демонстрації використання SQL-запитів з об'єднанням рядків публічної і прихованої таблиці, що дозволяє отримати список користувачів з таблиці (user), який зазвичай є прихованим. У разі впровадження SQL-ін'єкцій до захищеної системи у відповідь на запит видається помилка (рис. 4).

**Висновки.** Пропоноване ПЗ «Моделювання атак типу SQL-ін'єкцій до баз даних»

впроваджено у навчальний процес МНУ ім. В.О.Сухомлинського у 2017–2018 н. рр. Останнє дозволило збільшити продуктивність використання навчального часу на 40% під час вивчення теми «Методи та способи захисту даних баз даних» (дисципліна «Бази даних та інформаційні системи») та «Розробка програмного забезпечення з підключенням баз даних» (дисципліна «Програмування»).

#### Список літератури:

1. Макаров Т. MS SQL Injection, 2010. URL: <http://whatis.ru/razn/razn13.shtml> (дата звернення: 14.12.2018).
2. Посимвольный перебор в базах данных на примере MySQL. URL: <https://www.securitylab.ru/contest/212099.php> (дата звернення: 17.01.2019).
3. Cerrudo C. Manipulating Microsoft SQL Server Using SQL Injection. Application Security, Inc., 2005. 14 p.
4. Maor O., Shulman A. Blindfolded SQL Injection. Imperva. Inc, 2003. 17 p.
5. Maor O., Shulman A. SQL Injection Signatures Evasion. Imperva. Inc, 2004. 17 p.
6. SQL-Injection на примерах. URL: <http://injection.rulezz.ru/sql-injection-by-example.html> (дата звернення: 11.01.2019).
7. SQL-Injection. Are Your Web Applications Vulnerable? // SPI Labs. SPI Dynamics, 2002. 31 p.
8. SQL-инъекция в MySQL. SecurityLab. 2004. URL: <https://www.securitylab.ru/contest/212101.php> (дата звернення: 23.11.2018).

#### ПРИМЕНЕНИЕ ВАЛИДАТОРОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ SQL-ИНЪЕКЦИЙ В БАЗАХ ДАННЫХ

*В статье описана разработка программного обеспечения для реализации методов SQL-инъекций с целью использования в учебных целях. Моделируются случаи реализации SQL-вставок, выделяются их особенности для понимания механизмов работы. Приведены особенности реализации модели исследования SQL-инъекций с помощью валидаторов. Рассмотрена работа модели для исследования SQL-инъекций. В модели реализована возможность просмотра результата инъекции в случае защищенной и незащищенной от SQL-инъекций базы данных.*

**Ключевые слова:** база данных, SQL-инъекция (SQL-Injection), программное обеспечение, защита данных, атака.

**APPLICATION OF VALIDATORS FOR THE IMPLEMENTATION  
OF THE MODEL OF RESEARCH OF SQL INJECTIONS IN DATABASES**

*The article describes the development of software for the implementation of SQL injection methods for educational purposes. The cases of implementing SQL inserts are modeled, their features are highlighted to understand the mechanisms of operation. The features of the implementation of the SQL injection study model using validators are given. Considered the work of the model for the study of SQL injection. The model has the ability to view the injection result in the case of a database protected and unprotected from SQL injection.*

**Key words:** database, SQL Injection, software, data protection, attack.

УДК 004.491.42

Савенко О.С.

Хмельницький національний університет

## ВИЯВЛЕННЯ БОТ-МЕРЕЖ РОЗПОДІЛЕНИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВІ КЛАСИФІКАЦІЇ

*У статті представлено типи бот-мереж на основі їх характерних особливостей архітектури, функційного призначення елементів та з урахуванням архітектури засобів виявлення. Це представлення формалізоване до компонент векторів і на його основі здійснено створення зразків для підкласів та класів, які використовуються в баєсівському класифікаторі компонентів бот-мереж. Розроблений метод виявлення бот-мереж на основі класифікатора містить два рівні. Перший (хостовий) рівень при виявленні використовує баєсів класифікатор, що досліджує вектор викликів API функцій. На основі отриманого результату на другому (мережному) рівні здійснюється оцінка ймовірності наявності бот-мереж всією розподіленою системою.*

**Ключові слова:** розподілена система, зловмисне програмне забезпечення, бот-мережі, мережні антивіруси, наївний баєсів класифікатор, класифікація.

**Постановка проблеми.** Тенденції розвитку технологій створення і поширення зловмисного програмного забезпечення (ЗПЗ) демонструють активне розширення технічних можливостей таких засобів. Це досягається шляхом зацікавленості в ньому дедалі більшої кількості користувачів. Основними мотиваційними чинниками, що спонукають до його створення, є бажання досягти фінансової вигоди та політичної переваги. Одним з актуальних напрямів розвитку зловмисного програмного забезпечення є розробка бот-мереж, які надають змогу зловмисникам отримувати віддалений доступ до комп'ютерів користувачів. Завдана використанням такого зловмисного програмного забезпечення шкода стрімко зростає. Тому дослідження бот-мереж із метою розробки нових методів і засобів їх виявлення є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нині до проблеми виявлення бот-мереж прикута увага як комерційних антивірусних засобів, так і науковців, що ставлять за мету розробку принципово нових підходів та методів до виявлення бот-мереж, зокрема нових, які раніше були невідомими.

Оскільки бот-мережі є керованим розподіленим програмним забезпеченням, його виявлення доцільно проводити розподіленими засобами. До таких засобів належать мережні антивірусні засоби. Мережне антивірусне програмне забезпечення переважно використовується разом із засобами антивірусного захисту вузлів мережі (робочих станцій і серверів) як другий рівень захисту для підвищення достовірності виявлення

і блокування зловмисного програмного забезпечення. Якщо на першому рівні захисту атаку не буде виявлено, тоді зберігається ймовірність його виявлення та блокування на другому рівні захисту.

Відомі реалізації таких засобів переважно мають єдиний центр керування з певним рівнем централізації. До таких засобів зараховують: ESET® Endpoint Security для Windows, яка реалізована у вигляді системи захисту кінцевих точок у корпоративних мережах [1], «Dr.Web CureNet!» [2], Symantec Endpoint Protection [3], «Malwarebytes Endpoint Security» [4], «Cisco® Network Admission Control (NAC)» [5]. В антивірусі Kaspersky Administration Kit [6] реалізовано принцип автономної роботи і прийняття рішень без участі адміністратора, якому видаються лише повідомлення про критичні ситуації. Проте, як і у випадку з рештою мережних антивірусних засобів, принцип його функціонування базується на централізованому способі організації взаємодії компонентів системи. Відомі засоби виявлення бот-мереж побудовані на основі методів, які недостатньо враховують всі стадії функціонування бот-мереж та можливі їх структурні особливості, що призводить до зниження достовірності виявлення.

Проаналізуємо відомі методи виявлення бот-мереж. В статті «Botnet evolution: Network traffic indicators» [7] автори здійснюють аналіз та розробку методів виявлення бот-мереж з обов'язковим врахування можливих архітектур бот-мереж. Розробка методів без врахування принципових особливостей архітектур бот-мереж дає змогу зловмисникам обходити засоби, які використовують типові представлення.

Система, яка базується на необхідності врахування особливостей побудови та структури бот-мережі, представлена в роботі «Experiments With Simulation Of Botnets And Defense Agent Teams» [8]. В основу її роботи покладено принцип моделювання агентами архітектур бот-мереж із різними механізмами їх функціонування.

Методи виявлення бот-мереж, представлені в роботах певних науковців [9–13], базуються на аналізі трафіку. Процес виявлення бот-мереж передбачає порівняння отриманих результатів аналізу трафіку з шаблонами бази аномалій.

Недоліком представлених методів є необхідність постійного розбору трафіку та виділення важливих характеристичних ознак, які можуть змінюватись зловмисниками. При цьому не враховано архітектуру бот-мережі і блокування пакетів у подальшому не гарантує їх повторення.

У роботах науковців [14–16] представлено методи виявлення відомих ботів на основі використання сигнатурного аналізу. Вони передбачають контроль кожного пакету, і порівняння їх із попередньо налаштованими сигнатурами і шаблонами атаки, що містяться в базі даних. Спільним недоліком цих методів є необхідність оновлення шаблонів, що впливає на ефективність виявлення нових бот-мереж або їх вузлів, які не представлені у базі сигнатур.

В статті «Multi-agent based approach of botnet detection in computer systems» [17] представлено метод локалізації бот-мереж у корпоративних комп'ютерних мережах, який включає використання мультиагентної системи для обміну інформацією між групами агентів із метою визначення рівня присутності бот-мереж. Розроблений метод базується на централізації та здійсненні перепідключення хостів як засіб прояву присутності бот-мереж.

Автори в статті «Attractiveness Study of Honeypots and Honeynets in Internet Threat Detection» [18] розробили систему приманок для провокування проявів зловмисного програмного забезпечення, яка розміщена в розподіленій системі. Для виявлення нових бот-мереж вона потребуватиме її постійного доповнення.

Відомі методи та засоби не забезпечують високого рівня достовірності у процесі виявлення нових бот-мереж. Це пояснюється застосуванням зловмисниками великої кількості різних технологій та методів приховування наявності та поширення бот-мереж у комп'ютерних системах, а також відставанням розроблених відомих методів їх виявлення у зв'язку з появою нових, раніше не

відомих можливостей функціонування бот-мереж. Крім того, мережні антивірусні засоби побудовані переважно як жорстко централізовані, що також використовується зловмисниками для атаки на КС, в яких, ймовірно, знаходиться їх центр.

Тому розробка нових методів і засобів, які б протидіяли бот-мережам і враховували перспективні можливості їх створення, функціонування та архітектуру засобів виявлення, є актуальною проблемою сьогодення.

У статтях «Архітектура розподіленої багаторівневої системи виявлення шкідливого програмного забезпечення в локальних комп'ютерних мережах» та «Distributed Malware Detection System Based on Decentralized Architecture in Local Area Networks» [19; 20] представлена архітектура розподіленої системи виявлення зловмисного програмного забезпечення в локальних комп'ютерних мережах, яка є децентралізованою і дає змогу здійснювати її наповнення різними функціоналами виявлення. Розподілена система належить до реагуючих систем, яка постійно здійснює моніторинг запущених процесів та виконуваних програм у комп'ютерних системах мережі. Об'єктами для дослідження зі сторони системи є перевірка наявного програмного забезпечення та запущених процесів у комп'ютерних системах локальної мережі на присутність зловмисного програмного забезпечення.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Методи та засоби виявлення бот-мереж характеризуються за місцем, в якому здійснюється дослідження програмного забезпечення на наявність зловмисних компонент, та його локацією в межах комп'ютерних систем, які можуть досліджуватись локально чи бути в певному середовищі, що поєднуватиме їх у локальну мережу. Також важливою є орієнтація на час дослідження. Зокрема, виявлення може здійснюватись у момент атаки, після атаки чи після тривалого спостереження. Ці особливості впливають на розробку методів і засобів виявлення бот-мереж. Характерною особливістю бот-мереж, яку треба враховувати під час розробки ефективних методів їх виявлення, є час, який витрачається на наповнення бот-мережі новими вузлами. Водночас чинні вузли, контролюючи свої комп'ютерні системи, перебувають у стадії очікування команд від зловмисника, проводять певні роботи з перевірки своєї цілісності, використовуються зловмисником задля нарощування бот-мережі новими вузлами. Ці особливості стадій функціонування вузлів бот-мереж треба враховувати у процесі розробки методів їх



виявлення, які орієнтовані на тривалий активний моніторинг подій у комп'ютерних системах. Це особливо актуально, коли зловмисне програмне забезпечення проникає в комп'ютерні системи, обминаючи засоби його виявлення, які орієнтовані на атаки чи автономну роботу тільки в окремих комп'ютерних системах.

Враховуючи, що бот-мережі створюються у вигляді розподілених систем, це надає їм перевагу над окремими хостами мережі. Таким чином, ефективні методи та засоби теж мають орієнтуватись на використання їх у мережах, тобто бути розподіленими. Організувати роботу таких розподілених засобів можна в локальних мережах організацій та підприємств. Однією з переваг дослідження виявлення бот-мереж саме в локальних мережах є наявність відомостей про встановлене там програмне забезпечення адміністратором мережі.

Таким чином, розробку методів та засобів виявлення бот-мереж у локальних мережах комп'ютерних систем орієнтуватимемо на їх використання для організацій та підприємств на етапі наповнення бот-мереж новими вузлами.

Розробка методу виявлення бот-мереж потребує здійснення аналізу їх архітектури та можливостей. Нині немає загальноприйнятого чіткого стандарту для бот-мереж стосовно їх структури, класифікації, можливих зловмисних дій. Тому при розробці методів їх виявлення необхідним є здійснення представлення об'єкта дослідження формалізованими загальноприйнятими засобами та його функційних можливостей.

Бот-мережа являє собою комплекс розподіленого програмного забезпечення, який охоплює велику кількість вузлів і містить рівень зв'язуючого програмного забезпечення. За своєю структурою

в бот-мережах виділяють вузли, які належать до керування мережею і підтримки її цілісності, та вузли, які є кінцевими і з яких здійснюється виконання зловмисних дій. Керування бот-мережею здійснюється зловмисником через командно-контролюючий центр безпосередньо або через інші проміжні віддалені контролюючі центри. Виділимо такі складники бот-мережі: командно-керуючий центр, контролюючі центри, базові елементи мережі (боти). Зображення узагальненої структури бот-мережі представлено на рис. 1. Командно-контролюючі центри бот-мережі позначимо їх підмножинами  $E_{1,i_1}$ , де  $i_1 = 1, 2, \dots, n_1$ ,  $n_1$  – кількість командно-керуючих центрів бот-мережі. Кількість таких центрів може бути різною. Контролюючі центри бот-мережі позначимо підмножинами  $E_{2,i_2}$ , де  $i_2 = 1, 2, \dots, n_2$ ,  $n_2$  – кількість контролюючих центрів бот-мережі. Базові елементи бот-мережі позначимо підмножинами  $E_{3,i_3}$ , де  $i_3 = 1, 2, \dots, n_3$ ,  $n_3$  – кількість базових елементів мережі.

Вважатимемо, що побудована бот-мережа може тільки розширюватись і при цьому змінювати конфігурування, а зміна її структури здійснюється виключно адміністратором за потреби, а не динамічно за заданими алгоритмами. Бот-мережі можуть мати різну архітектуру залежно від топології і зв'язку елементів: мультисерверну, ієрархічну, випадкову (peer-to-peer), гібридну. Представлена на рис. 1 архітектура є узагальненою і покриває ці топології.

Представимо цілісну бот-мережу, як об'єднання її складових частин, так:

$$E = \bigcup_{i_1=1}^{n_1} E_{1,i_1} \cup \bigcup_{i_2=1}^{n_2} E_{2,i_2} \cup \bigcup_{i_3=1}^{n_3} E_{3,i_3}, \quad (1)$$

де  $E$  – множина складових частин бот-мережі. Елементами підмножин  $E_{w,i}$  є функції  $f_{i_1,i_2,i_3}$ . У різних елементах підмножин  $E_{w,i}$  можуть бути

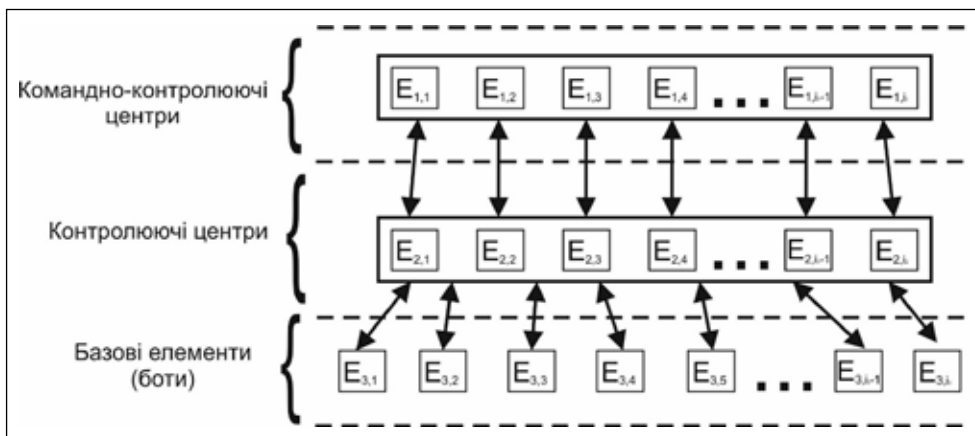


Рис. 1. Структура розподіленої керованої бот-мережі

однакові функції. Функційне навантаження кожної з виокремлених за призначенням функцій залежить від типу операційних систем та їх API функцій відповідно. Представимо функції, що формують функціонування бот-мереж, через API виклики. Для цього виділимо особливі дії, які описуватимуться відповідними API функціями та можуть бути зараховані до зловмисних дій бот-мережі. Такими діями можуть бути: сканування портів, розсилання спаму, завантаження файлів, перегляд директорій, переміщення файлів або директорій, створення перенаправлених портів, відкриття файлів, знищення процесу, виконання файлів, запис даних про натиснені клавіші, створення і знищення директорій, перегляд директорій, здійснення атак, створення хибного проксі-сервера тощо.

Для представлення цих дій, які реалізовані у відповідних елементах, введемо вектори зловмисних дій та атак  $v_{z, f_{i_1, i_2, i_3}}$ , відповідні їм вектори кількості входжень API функцій  $v_{API, x, f_{i_1, i_2, i_3}, m_u, l}$  та вектори, ймовірно, зловмисних дій  $v_{p, e_s} = (v_{p, e_s, 1}, v_{p, e_s, 2}, \dots, v_{p, e_s, n_p})$ , відповідні їм вектори кількості входжень API функцій  $v_{p, K, e_s} = (v_{p, K, e_s, 1}, v_{p, K, e_s, 2}, \dots, v_{p, K, e_s, n_p})$ , де  $z$  – позначення зловмисної дії та атаки,  $x$  – номер операційної системи,  $p$  – позначення ймовірно зловмисної дії,  $m_u$  – кількість компонент вектора,  $l$  – кількість варіацій,  $e_s$  – номер вектора,  $e$  – число, що відповідає номеру вектора, який сформовано з певної кількості або всіх API функцій досліджуваного процесу,  $s$  – номер варіанта послідовності API функцій досліджуваного процесу вектора для  $e$  процесу,  $n_p$  – кількість компонент вектора  $v_{p, e_s}$ . Компонентами вектора  $v_{p, e_s}$  є номери API функцій, які отримуються із загальної нумерації для всіх таких функцій і функцій для бот-мереж. Згідно з класифікатором необхідно встановити належність вектора  $v_{p, e_s}$  до одного з класів бот-мереж.

На основі загальної структури (рис. 1) бот-мережі, яка наповнена функціями і їх представленнями через вектори зловмисних дій та атак, задамо еталонну модель бот-мережі і зарахуємо її до класу '0'. Відомі типи бот-мереж, які класифіковано, можуть мати менше функційних можливостей, але при цьому обов'язково певні їх функції проявлятимуться частіше, на основі чого і було їх класифіковано. Відомі типи бот-мереж зарахуємо до класів '1'–'6' [17]. З появою нових типів бот-мереж кількість класів може збільшуватись. Векторів зловмисних дій атак для однієї і тієї самої функції може бути кілька, що означає варіацію представлення. Такі вектори будуть міс-

тити набори API функцій, які найчастіше викликатимуться для виконання певних визначених функцій і, відповідно, характеризуватимуть класи бот-мереж. Враховуючи, що у вектор зловмисних дій та атак будуть збиратись API функції певної функції вузла бот-мережі, вони не можуть характеризувати і порівнюватись з усім класом. Заради цього в кожному класі виділимо підкласи, які відповідатимуть відокремленим елементам.

Для зарахування отриманого вектора ймовірно зловмисних дій до зловмисного ПЗ або корисного здійснимо класифікацію за введеними класами типів бот-мереж. Враховуючи показники швидкості, які необхідно забезпечити задля отримання результатів програмним модулем (ПМ) розподіленої багаторівневої системи (РБС) [19; 20], виберемо найвний баєсівський класифікатор.

Нехай

$$V_p = \{v_{p, 1}, v_{p, 2}, \dots, v_{p, n_p}\}$$

– вибірка, сформована на основі значень API функцій для векторів типу  $v_{p, e_s}$ ,  $A$  – гіпотеза про належність значень  $V_p$  до одного з класів  $K_l$  бот-мереж, де  $l=0, 1, \dots, 6$ . Для вирішення задачі класифікації необхідно визначити ймовірність того, що вибірка  $V_p$  належить класу  $K_b$ , враховуючи знання про опис атрибутів  $V_p$ . З цією метою, використовуючи теорему Баєса, визначимо апостеріорну ймовірність  $P(A | V_p)$ , тобто ймовірність того, що значення  $A$  залежить від певних атрибутів вибірки  $V_p$ .

Класи бот-мереж  $K_l$  визначені і представлені сукупністю пар двох векторів  $v_{z, f_{i_1, i_2, i_3}}, v_{API, x, f_{i_1, i_2, i_3}, m_u, l}$ . Вибірка  $V_p$  належить до класу  $K_l$  з найвищою апостеріорною ймовірністю тоді і тільки тоді, коли виконується умова:

$$P(K_{l_1} | V_p) > P(K_{l_2} | V_p), \quad (3)$$

для всіх  $l_1$  та  $l_2$  таких, що  $0 \leq l_1 \leq 6, 0 \leq l_2 \leq 6, l_1 \neq l_2$ . Таким чином, здійснюємо пошук класу, який максимізує ймовірність  $P(K_l | V_p)$ . Тоді такий клас  $P(K_l | V_p)$  буде класом із максимальною апостеріорною гіпотезою. Для зарахування вектора до певного класу знайдемо добуток ймовірностей тих API функцій, які увійшли у вектор ймовірно підозрілих дій. Використовувана мультиномінальна генеративна модель враховує кількість повторень API функцій і не враховує відсутність певних API функцій. З метою здійснення пошуку в підкласах класу у застосуємо формулу 4:

$$P(K_{y, g} | v_{p, e_s}) = \frac{\prod_{j=1}^{m_{u, y}} v_{API, x, w, f_{i_1, i_2, i_3}, g, l}^{*} \cdot l_{m_{u, y}}}{\prod_{g=1}^{n_{vp}} \frac{v_{p, K, e_s, w+1}}{n_{vp}+1}}, \quad (4)$$

Задля проведення навчання необхідно визначити ймовірності  $P(v_{z, v, f_{i_1, i_2, i_3}} | K_{y, g})$ . Обчислимо

оптимальні оцінки ймовірностей того, що певна API функція зустрінеться в кожному класі чи підкласі, згладивши результат за схемою Лапласа задля уникнення проблеми «нульової частоти»:

$$P(v_{z,d,f_{i_1,i_2,i_3}} | K_{y,g}) = \frac{1 + \sum_{b=1}^{m_{u,y}} I_{g,y} v_{API,x,b,f_{i_1,i_2,i_3},g} P(K_{y,g} | v_{z,b,f_{i_1,i_2,i_3}})}{n_{m_u} + \sum_{d=1}^{m_{u,y}} \sum_{b=1}^{m_{u,y}} I_{g,y} v_{API,x,d,f_{i_1,i_2,i_3},g} P(K_{y,g} | v_{z,b,f_{i_1,i_2,i_3}})} \quad (5)$$

Навчання баєсівського класифікатора подамо у вигляді такої послідовності кроків:

1) визначимо підкласи, що складаються з одного представлення API функцій, та розрахуємо ймовірності для кожної API функції, що входять до заданого класу та підкласу; зафіксуємо отримані результати як первинні.

2) для кожної відомої наступної варіації компоненти функції, що представлена API функціями, здійснимо класифікацію для класів і підкласів; якщо отримане представлення зараховане вірно до вказаного підкласу, тоді додаємо його марковані елементи до тих, що вже є у підкласі, як окремий зразок; якщо отриманий результат не зараховує його до потрібного підкласу, тоді треба зарахувати його до його підкласу, але при цьому зробити порівняння з іншими значеннями класів; результатом порівняння буде відхилення, тобто різниця, ймовірностей від початкових; якщо результуюча ймовірність суттєво (більше встановленого порогового значення) відрізняється від первинної ймовірності підкласу чи класу, тоді створюємо окремий підклас цього підкласу класу; фіксуємо для кожного кроку навчання отримані ймовірності для кожної API функції, підкласів та класів; для тих підкласів і класів, де розбіжність із первинними становить більше порогового значення, здійснюємо створення нового підкласу в його підкласі; отримані за кілька ітерацій всі ймовірності усереднюємо та фіксуємо як відповідні ймовірності для використання в подальших розрахунках;

3) після завершення основного етапу навчання та доповнення баєсівського класифікатора новими даними здійснимо перевірку відхилень для додатково сформованих підкласів певних підкласів і встановимо розбіжність між їхніми середніми значеннями ймовірностей; якщо розбіжність становить менше порогового значення, тоді доповнюємо підклас даними додаткового підкласу, його вилучаємо та перераховуємо всі ймовірності і їхні середні значення;

4) визначаємо різниці середніх ймовірностей за кроками навчання та ймовірностей, отриманих за розрахунком класифікатора; якщо для певних підкласів різниці становлять більше порогового зна-

чення, тоді продовжуємо для них навчання додаванням додаткових даних і повторення кроків 1–3.

Вектор  $v_{p,e_s}$  може бути не зарахований до жодного класу і підкласу із заданих, тобто дослідження його компонент встановило, що серед них немає ймовірно зловмисних дій. Але встановлення такого факту базується на застосуванні не тільки пошуку максимального значення ймовірності, обчисленої за теоремою Баєса, але і відповідність цієї ймовірності пороговим значенням класів і підкласів, визначення яких здійснюють у процесі навчання класифікатора. Це пов'язано з тим, що виконуваний процес, який відображено вектором  $v_{p,e_s}$ , може не належати до зловмисного програмного забезпечення, тобто належати класу корисного ПЗ. В такому разі виконуваний процес далі не розглядається.

Здійснення самонавчання проводимо за схемою навчання (кроки 1–4). При аналізі вектора ймовірно зловмисних дій заносимо почергово його дані до кожного класу та здійснюємо розрахунки. Якщо відхилення отриманих ймовірностей перебувають у межах порогових значень для одного з підкласів, тоді після завершення класифікації включаємо його нові дані до його підкласу та робимо новий розрахунок для всього класифікатора і його середніх значень відхилень ймовірностей.

Після додавання нового елемента до класифікатору ПМ в одній із КС здійснюється розсилання решті ПМ розподіленої системи інформації про цю подію та самого контейнера з новим елементом для доповнення класифікатора. Таким чином, знання, отримані одним ПМ, передаються іншим компонентам системи для використання.

Рішення про місце здійснення обробки сформованого вектора ймовірно зловмисних дій визначає ПМ, в якому було зібрано ці дані. Якщо аналіз завантаження основних ресурсів показує високий рівень завантаженість, тоді він направляє запит іншому ПМ на можливість обробки. Після отримання підтвердження ПМ КС надсилає відповідний контейнер із вектором. Результати обробки в цьому разі надходять тому ПМ, який ставив задачу обробки, якщо ймовірність наявності зловмисного коду не встановлена. Якщо ж класифікатор програмного модуля обробника встановив наявність зловмисного коду, тоді він виконує наступну послідовність дій: додає до свого класифікатора, розсилає відповідний контейнер із новими знаннями (інформація про новий елемент для класифікатора, дані про виконуваний процес, на основі якого сформовано такий вектор) решті

ПМ та повідомлення тому ПМ про наявність у КС процесу, який виконує зловмисні команди.

Метод виявлення бот-мереж у комп'ютерних системах локальних мереж на основі залучення розподілених систем [19; 20] складається з таких основних кроків:

1) проведення активного моніторингу виконання команд у КС (починаючи з першої API функції кожного процесу, що буде виконуватись після запуску КС) та отримання даних про активні процеси та мережні пакети;

2) здійснення збору даних моніторингу після виявлення певних ймовірно зловмисних проявів у КС у вектор;

3) формування вектора ознак ймовірно підозрілих дій для зібраних даних, компонентами якого є API функції;

4) прийняття рішення про місце обробки вектора ймовірно зловмисних дій;

5) якщо аналіз завантаженості ресурсів КС показав низький рівень завантаженості, тоді треба здійснити обробку в цій КС, інакше надіслати в іншу визначену ПМ КС;

6) здійснення класифікації вектора ймовірно зловмисних дій та аналіз її результатів.

6.1) якщо встановлено зарахування такого вектора до певного підкласу класу бот-мереж, тоді додавання цієї інформації до класифікаторів всіх ПМ;

6.2) якщо встановлено віднесення такого вектора до декількох підкласів класів бот-мереж, тоді здійснити аналіз із залученням решти ПМ розподіленої системи на основі обробки варіантів подій;

6.3) якщо близькість для включення до певного підкласу є нечіткою, але додатково із залученням решти ПМ визначено, що вектор містить зловмисні дії, тоді треба здійснити створення нового класу для бот-мереж, занести дані, оновити налаштування класифікатора, передати результат решті КС;

6.4) якщо перевірка встановила, що досліджуваний вектор не містить зловмисного навантаження, тоді варто здійснити зупинку дослідження процесу, на основі якого він був сформований;

6.5) якщо встановлено, що досліджуваний вектор містить зловмисне навантаження, тоді треба здійснити зупинку відповідного процесу;

6.6) здійснення пошуку й дослідження на основі отриманих відомостей аналогічних процесів в інших КС мережі, де встановлена РБС її програмними модулями;

7) обчислення значення ймовірностей в станах ПМ і формування вимоги для інших ПМ здійснити обчислення ймовірності бути ураженою для всієї РБС [20] – цей крок здійснюється через дослідження наявного зловмисного прояву.

Розроблений метод виявлення бот-мереж дозволяє виявляти бот-мережі, використовує баєсівський класифікатор, здійснює обмін отриманими результатами між програмними модулями РБС.

**Експерименти.** Метою експериментів була перевірка застосування методу виявлення, роботи класифікатора в структурі розподіленої системи та визначення залежності відсотку виявлених вузлів бот-мережі від їх представлення векторами та різними класифікаторами.

Для підготовки до проведення експериментів було здійснено конструювання 28 штучних бот-мереж та отримано коди відомих виявлених бот-мереж. Всі згенеровані бот-мережі згруповано за класами, в яких виділено 25 структурних елементів на трьох стадіях функціонування та 81 функцію. Варто зазначити, що не всі отримані таким чином бот-мережі містили повністю всі структурні елементи та функції.

Кожну функцію задано векторами зловмисних дій та атак з урахуванням варіацій та на основі яких побудовано зразки задля їх включення в підкласи і класи. Експеримент проводився для класифікатора без додавання екземплярів створених бот-мереж та з ними, тобто здійснювалась перевірка без навчання класифікатора на створених зразках і з попереднім зарахуванням зразків по класах. Другий варіант є необхідним для перевірки точності зарахування до класів тестових зразків, з яких ці класи були сформовані, оскільки у процесі здійснення моніторингу API функцій можуть бути похибки, а також для встановлення величини різниці у двох випадках без попереднього навчання і з ним. Це необхідно, щоб перевірити залежність виявлення за векторами по кожному класу і загальну кількість виявлених вузлів бот-мереж та точність класифікації. Експеримент здійснювався в межах 19 комп'ютерних систем локальної мережі. Кожна з КС містила ПМ РБС. Інших антивірусних засобів у КС не встановлено. Спочатку було встановлено ПМ із класифікатором, в якому не було зразків створених бот-мереж. В одній із КС було розміщено командно-контролюючий центр, у трьох КС було розміщено контролюючі центри, до кожного з яких було під'єднано по п'ять вузлів у кожній із п'ятнадцяти КС. Встановлення штучно згенерованих бот-мереж здійснювалось почергово. Після завершення експерименту з окремо згенерованою бот-мережею здійснювалось повне оновлення всіх КС, при цьому класифікатор залишався без змін для кожного випадку. Тривалість моніторингу КС становила 96 годин для кожного екземпляра

бот-мережі кожного з двох класифікаторів. Атака з вузлів бот-мережі не здійснювалась. Вузли бот-мережі працювали тільки в режимі контролю КС та підтримки структури бот-мережі через відправлені повідомлення. Таким чином, для ПМ РБС об'єктами дослідження були запуснені в КС процеси і, відповідно, побудова векторів за ними. З метою проведення експерименту було обрані бот-мережі, які використовують стратегію отримання повного контролю в КС. Для здійснення експерименту засобами АРІ моніторингу в КС було отримано вектори, які почергово оброблено класифікатором ПМ. Результати обробки представлено в табл. 1.

Експерименти передбачали визначення таких показників ефективності виявлення вузлів бот-мереж для класів і підкласів баєсівського класифікатора:

1)  $P_{1,1}$  – відсоток векторів зловмисних дій та атак для вузлів бот-мереж, що належать цьому класу щодо всіх тестових зразків, які система зарахувала до цього класу з використанням попереднього навчання;

2)  $P_{1,2}$  – аналогічно до 1) тільки без використання попереднього навчання;

3)  $P_{2,1}$  – відсоток векторів зловмисних дій та атак для вузлів бот-мереж, що належать цьому підкласу класу щодо всіх тестових векторів, які система зарахувала до цього підкласу класу в тестовій вибірці (ті, які були вірно зараховані до підкласів) із використанням попереднього навчання;

4)  $P_{2,2}$  – аналогічно до 3) тільки без використання попереднього навчання;

5)  $P_{3,1}$  – відсоток вірно виявлених вузлів бот-мереж із використанням попереднього навчання;

6)  $P_{3,2}$  – аналогічно до 5) тільки без використання попереднього навчання;

7)  $P_{4,1}$  – відсоток хибно класифікованих вузлів бот-мереж як корисних додатків (помилка 1-го роду) із використанням попереднього навчання;

8)  $P_{4,2}$  – аналогічно до 7) тільки без використання попереднього навчання;

9)  $P_{5,1}$  – відсоток не вірно класифікованих вузлів бот-мереж, як таких що є вузлами бот-мереж, але віднесені не до того класу (помилка 3 - го роду) з використанням попереднього навчання;

10)  $P_{5,2}$  – аналогічно до 9) тільки без використання попереднього навчання.

Результати оцінки ефективності виявлення програмного забезпечення вузлів бот-мереж на основі роботи двох класифікаторів для введених класів та підкласів у класифікаторі наведено у таблиці 1.

У результаті проведення експерименту отримано зарахування до потрібного підкласу та класу отриманих на основі моніторингу векторів із точністю до 66% для класифікатора без введених векторів 28 штучно згенерованих бот-мереж та 88% для класифікатора, в який попередньо було додано вектори шляхом здійснення його навчання, зберігаючи в ньому шаблони попередніх наповнень. Перевірка здійснювалась окремо для класів, їх підкласів та загалом для вузлів. Результати були усереднені та їх дисперсія відносно середнього значення становить 1%. Різниця відхилення для двох класифікаторів по кожному класу, підкласу і вузлів бот-мереж і загалом становить 21,5%. Відхилення між різницями відхилень для двох класифікаторів становить по кожному окремому класу, підкласу та вузлу бот-мережі менше 5%, що вказує на точність визначення в різних класах і підкласах. Це означає, що результат виявлення програмного забезпечення вузлів бот-мереж збігається в розрізі класів та підкласів для векторів зловмисних дій та атак.

Помилки 1-го роду склали для першого і другого класифікаторів 11,7% та 31,97%, що пояснюється їх різним наповненням. Помилки 3-го роду – 0,01% та 2,14% відповідно, що пояснюється ширшим полем класифікації другого класифікатора через менший обсяг навчальної вибірки. Загалом результати роботи класифікаторів показують можливість їх застосування для задач виявлення бот-мереж.

**Висновки.** У статті представлено метод виявлення бот-мереж на основі застосування розподілених систем та класифікатора. Метод виявлення складається з двох частин: хостового і мережного рівнів. На рівні хостової частини процедура виявлення базується на реалізації класифікації Баєса. Мережний рівень розширює результати, отримані на рівні хоста, до решти локальної мережі. Розроблений метод забезпечує обмін результатами, отриманими за класифікацією Баєса, для подальшого використання іншими компонентами розподіленої системи. Результати розробленого класифікатора показують, що представлення зразків бот-мереж для різних класів і підкласів достатньо для ефективного виявлення бот-мереж. Результати експерименту показали, що точність виявлення бот-мереж сягає 88%.

Напрямами подальших досліджень є розробка нових методів виявлення ЗПЗ, які б були орієнтовані на архітектуру розподіленої системи, де вони будуть реалізовані, та використовували цю перевагу над іншими хостовими методами.

## Результати експерименту

Показники експерименту	Отриманні значення для різних класів							Середні значення
	Class 0	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6	
$P_{1,1}$ , %	90,74	84,29	73,66	86,30	94,04	94,18	96,60	89,44
$P_{1,2}$ , %	75,93	63,57	60,22	70,32	68,77	67,60	69,36	67,71
$ P_{1,1}-P_{1,2} $ , %	14,81	20,72	13,44	15,98	25,27	26,58	27,24	21,73
$P_{2,1}$ , %	85,80	83,57	72,58	85,39	98,88	93,92	96,60	88,42
$P_{2,2}$ , %	74,69	63,57	59,14	70,32	67,37	66,58	67,66	66,80
$ P_{2,1}-P_{2,2} $ , %	11,11	20	13,44	15,07	31,57	27,34	28,94	21,62
$P_{3,1}$ , %	92,11	84,21	71,93	89,47	90,53	88,42	93,68	87,72
$P_{3,2}$ , %	76,32	57,89	63,16	64,91	71,58	54,74	75,79	65,89
$ P_{3,1}-P_{3,2} $ , %	15,79	26,32	8,77	24,56	18,95	33,68	17,89	21,83
$P_{4,1}$ , %	7,89	14,47	28,07	10,53	7,37	11,58	6,32	11,70
$P_{4,2}$ , %	21,05	40,79	36,84	31,58	24,21	44,21	22,11	31,97
$ P_{4,1}-P_{4,2} $ , %	13,16	26,32	8,77	21,05	16,84	32,63	15,79	20,27
$P_{5,1}$ , %	0	1,32	0	0	2,11	0	0	0,01
$P_{5,2}$ , %	2,63	1,32	0	3,51	4,21	1,05	2,11	2,14
$ P_{5,1}-P_{5,2} $ , %	2,63	0	0	3,51	2,1	1,05	2,11	2,13

## Список літератури:

1. Машинне навчання та знання людини в динамічній рівновазі. URL: [https://eset.ua/ua/products/for\\_business/security/endpoint\\_security](https://eset.ua/ua/products/for_business/security/endpoint_security) (дата звернення: 26.11.2018).
2. Доктор Веб. URL: <https://curenet.drweb.ru/> (дата звернення: 26.11.2018).
3. Обзор Symantec Endpoint Protection 12. URL: [https://www.anti-malware.ru/reviews/Symantec\\_Endpoint\\_Protection\\_12\\_2](https://www.anti-malware.ru/reviews/Symantec_Endpoint_Protection_12_2) (дата звернення: 26.11.2018).
4. Malwarebytes Endpoint Security. URL: Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки. (дата звернення: 26.11.2018).
5. Решение по безопасности беспроводных сетей на базе Cisco Network Admission Control. URL: <https://www.cisco.com/web/RU/products/hw/wireless/secure/cnac.html> (дата звернення: 26.11.2018).
6. Антивирусная защита сети Kaspersky Administration Kit. URL: [https://support.kaspersky.ru/learning/courses/kl\\_102.80/intro/section1](https://support.kaspersky.ru/learning/courses/kl_102.80/intro/section1) (дата звернення: 26.11.2018).
7. Rostami M.R., Eslahi M., Shanmugam B. and Ismail Z. Botnet evolution: Network traffic indicators. Biometrics and Security Technologies (ISBAST), 2014 International Symposium on, 2014. Pp. 274–279.
8. Kotenko I. (2013). Experiments With Simulation Of Botnets And Defense Agent Teams, ECMS 2013 Proceedings edited by: W. Rekdalsbakken, R. T. Bye, H. Zhang, European Council for Modeling and Simulation. doi:10.7148/2013-0061.
9. Sheng L., Zhiming L., Jin H., Gaoming D. and Wen H. A Distributed Botnet Detecting Approach Based on Traffic Flow Analysis. Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), 2012 Second International Conference on, 2012. Pp. 124–128.
10. Li S.-H., Kao Y.-C., Zhang Z.-C., Chuang Y.-P. and Yen D.C. A Network Behavior-Based Botnet Detection Mechanism Using PSO and K-means. ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS). 2015. Vol. 6. P. 3.
11. Stevanovic M. and Pedersen J.M. An analysis of network traffic classification for botnet detection. Cyber Situational Awareness, Data Analytics and Assessment (CyberSA). 2015 International Conference on, 2015. Pp. 1–8.
12. Gu G., Zhang J. and Lee W. BotSniffer: Detecting botnet command and control channels in network traffic, 2008.
13. Pomorova O., Savenko O., Lysenko S., Kryshchuk A. and Bobrovnikova K. A Technique for the Botnet Detection Based on DNS-Traffic Analysis. Computer Networks, ed: Springer, 2015. Pp. 127–138.
14. Zhang J., Perdisci R., Lee W., Sarfraz U. and Luo X. Detecting stealthy P2P botnets using statistical traffic fingerprints. Dependable Systems & Networks (DSN), 2011 IEEE/IFIP 41st International Conference on, 2011. Pp. 121–132.
15. Gu G., Porras P., Yegneswaran V., Fong M. and Lee W. BotHunter: detecting malware infection through IDS-driven dialog correlation. Proceedings of 16th USENIX Security Symposium on USENIX Security Symposium, Boston, MA, 2007.

16. Goebel J. and Holz T. Rishi: Identify Bot Contaminated Hosts by IRC Nickname Evaluation. HotBots. 2007. Vol. 7. P. 8.
17. Savenko O., Lysenko S. and Kryshchuk A. Multi-agent based approach of botnet detection in computer systems. Computer Networks, ed: Springer, 2012. Pp. 171–180.
18. Sochor T. & Zuzcak M. Attractiveness Study of Honeypots and Honeynets in Internet Threat Detection. 22nd Int. Conf. Computer Networks: Communications in Computer and Information Science 2015-06-16 Brunow. Cham: Springer International, 2015. Pp. 69–81. ISBN 978-3-319-19418-9.
19. Савенко О.С. Архітектура розподіленої багаторівневої системи виявлення шкідливого програмного забезпечення в локальних комп'ютерних мережах. Вчені записки Таврійського національного університету. 2018. Том 29(68). № 2. С. 172–181.
20. Markowsky G., Savenko O. and Sachenko A. (2019) Distributed Malware Detection System Based on Decentralized Architecture in Local Area Networks. Shakhovska N., Medykovskyy M. (eds) Advances in Intelligent Systems and Computing III. CSIT 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 871. Springer, Cham. P. 582–598.

### **ВИЯВЛЕННЯ БОТ-СЕТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИИ**

*В статье представлены типы бот-сетей на основе их характерных особенностей архитектуры, функционального назначения элементов и с учетом архитектуры средств обнаружения. Данное представление формализовано к компонентам векторов, и на его основе осуществлено создание образцов для подклассов и классов, используемых в классификаторе компонентов бот-сетей Байеса. Разработанный метод обнаружения бот-сетей на основе классификатора содержит два уровня. Первый (хостовой) уровень при обнаружении использует классификатор Байеса, исследует вектор вызовов API функций. На основе полученного результата на втором (сетевом) уровне осуществляется оценка вероятности наличия бот-сетей всей распределенной системой.*

**Ключевые слова:** *распределенная система, вредоносное программное обеспечение, бот-сети, сетевые антивирусы, наивный Байесовский классификатор, классификация.*

### **DISTRIBUTED SYSTEM OF DETECTION OF BOTNET BASED ON CLASSIFICATION**

*The article presents the types of botnets based on their characteristic features of architecture, functional purpose of elements and taking into account the architecture of detection tools. This representation is formalized to the component of the vectors and on its basis the creation of samples for subclasses and classes used in the Bayesian classification of botnet components was made. The developed method for detecting botnets based on the classifier has two levels. The first (host) level when detected uses a Bayesian classifier that examines the API function calls vector. On the basis of the obtained result at the second (network) level, an estimation of the probability of the availability of botnets by the entire distributed system is carried out.*

**Key words:** *distributed system, malware, botnet, network antivirus, naive Bayes classifier, classification.*

**Савчук Т.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Паламарчук В.Л.**

Вінницький національний технічний університет

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ОБФУСКАЦІЇ ПРОГРАМНОГО КОДУ НА ВИЯВЛЕННЯ ШКІДЛИВОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

*Поширення шкідливого програмного забезпечення на мобільних платформах заважає користувачам. Задля уникнення необхідності застосування механізму виявлення шкідливого ПЗ на основі цифрового підпису достатньо застосувати звичайну обфускацію програмного коду. У статті запропоновано підходи до виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі машинного навчання, що базуються на статичному й динамічному аналізі.*

**Ключові слова:** шкідливе програмне забезпечення, Android, обфускація, безпека, машинне навчання.

**Постановка проблеми.** Шкідливе програмне забезпечення (ПЗ), спрямоване на завдання шкоди користувачу, швидко та сильно поширюється останнім часом. Це сприяє діяльності зловмисників, оскільки користувачі зберігають все більше важливої інформації на своїх мобільних пристроях. При цьому слід взяти до уваги те, що база користувачів платформи Android склала на жовтень 2018 року 37,4% проти 36,2% у настільних комп'ютерах під управлінням Windows [1].

Сучасні засоби виявлення шкідливого ПЗ, що базуються на перевірці цифрового підпису ПЗ, є недостатніми для захисту користувача від нових загроз з боку зловмисників. Перевірка цифрового підпису ПЗ зазвичай базується на класифікації шкідливого програмного забезпечення, що є трудомісткою операцією та займає багато часу [2].

Сучасні системи виявлення шкідливого програмного забезпечення використовують як сигнатурний, так й евристичний методи виявлення, поєднуючи їх переваги та недоліки [3]. Основним способом виявлення більшості компонентів шкідливого програмного забезпечення все ще є перевірка сигнатур [4]. Однак сигнатурний метод непридатний для захисту від нових та поліморфних вірусних програм, оскільки до того, як шкідливе програмне забезпечення потрапить на аналіз експертам, створити його сигнатуру неможливо. Наявні евристичні технології, покликані допомогти у визначенні нових модифікацій шкідливого програмного забезпечення, не дають належного рівня розпізнавання у зв'язку з їх слабкою ефективністю під час роботи з обфускованими об'єктами. До недоліків наявних методів виявлення шкідливого програмного забезпечення також можна від-

нести вразливість до нових атак, низьку точність виявлення та швидкість роботи [5].

Сучасні системи виявлення шкідливого програмного забезпечення переважно не пристосовані до роботи в реальному часі, тоді як можливість обробляти великий обсяг даних в реальному часі є визначальним фактором використання таких систем.

Нині популярністю користуються комплексні рішення, що поєднують всі методи захисту проти більшості шкідливих програм. Це негативно впливає на швидкість роботи операційної системи та збільшує кількість ресурсів, що споживає антивірусна система. До найбільш відомих програм вітчизняного та зарубіжного виробництва для повного захисту пристроїв слід віднести такі, як Norton AntiVirus Internet Security, Panda Antivirus Internet Security, Trend Micro Enterprise Protection Strategy, McAfee Active Virus Defense, Sophos AntiVirus, NOD 32, а також найбільш популярні вітчизняні засоби захисту, такі як поліфаг Doctor Web та антивірусний комплекс «Доктор Касперський» [6].

Вказані недоліки важко усунути з використанням тільки класичних методів в галузі комп'ютерної безпеки [7]. У складі евристичних аналізаторів шкідливого програмного забезпечення активно використовуються штучні нейронні мережі (ШНМ) та штучні імунні системи (ШІС) [8].

Наявні ШНМ та ШІС дають змогу з великою часткою ймовірності виявити та ідентифікувати широкий клас шкідливого програмного забезпечення. Однак повністю ефективних способів боротьби із загрозами сьогодні не існує. Це визначає актуальність завдання розроблення нових підходів до виявлення та аналізування шкідливого програмного забезпечення, за допомогою яких можна



ефективно виявляти як старі, так і нові модифікації шкідливого програмного забезпечення з мінімальним навантаженням на систему.

**Постановка завдання.** Метою статті є формування підходів до виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі машинного навчання, що базуються на статичному й динамічному аналізі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

*Виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі машинного навчання.*

Розглянемо форми виявлення шкідливого ПЗ на основі машинного навчання, що базуються на результатах статичного та динамічного аналізу [9]. В обох випадках підхід складається з таких фаз:

- фаза класифікації, у якій вхідні дані програми  $A$  класифікуються як шкідливі або довірені (нешкідливі);

- фази навчання, в якій класифікатор навчається на основі двох наборів інформації  $A_T$  і  $A_M$ , які включають шкідливе та довірене ПЗ відповідно.

В обох фазах вектор вхідних даних, який отримується з програми  $A$ , буде отримуватись на етапі попереднього оброблення [10].

*Статичний аналіз.*

Статичний аналіз коду -На етапі машинного навчання здійснюється процедура вибірки, оскільки отриманий вхідний вектор може виявитись занадто потужним. Для кожної процедурної послідовності обчислюється частота відповідно до наборів  $A_T$  і  $A_M$ :

$$f_M(o) = \frac{1}{|A_M|} \sum_{A \in A_M} f(A, o);$$

$$f_T(o) = \frac{1}{|A_T|} \sum_{A \in A_T} f(A, o),$$

де  $o$  – послідовність системних кодів;  $A$  – програма, для якої здійснюється вибірка;  $A_T$  – набір довірених програм;  $A_M$  – набір шкідливих програм. Відносна різниця  $d(o)$  може бути визначена так [11]:

$$d(o) = \frac{abs(f_M(o) - f_T(o))}{\max(f_M(o), f_T(o))},$$

де  $o$  – послідовність системних кодів.

Отже, формується набір вибраних послідовностей  $O$ , який включає послідовності  $o$  з найбільшим значенням  $d(o)$ . Послідовності, для яких  $d(o) = 1$  (тобто ті послідовності, які присутні тільки в  $A_T$  або тільки в  $A_M$ ), не розглядаються, аби уникнути отримання класифікатора, який не можна визначити. Крім того, всі послідовності  $o$  в наборі  $O$ , які є підпослідовностями або частиною іншої послідовності  $o$ , також відкидаються, оскільки є зайвою інформацією.

Отриманий на етапі класифікації вектор  $V$  вибраних послідовностей вхідної програми  $A$  спочатку обчислюється на основі частоти появи

операційних кодів в  $O$ . Потім отримана інформація оброблюється за допомогою методу опорних векторів SVM, який формує відповідь у вигляді {довірене ПЗ, шкідливе ПЗ}.

*Динамічний аналіз.*

Динамічний аналіз програмного коду проводиться під час виконання програм на реальному або віртуальному процесорі (на відміну від статичного аналізу). Утиліти динамічного аналізу можуть вимагати завантаження спеціальних бібліотек, перекомпіляцію програмного коду, а також інструментувати код, що виконується. Задля підвищення ефективності динамічного аналізу програмного коду слід забезпечити достатню кількість вхідних даних досліджуваної програми [12].

Процес виявлення шкідливого ПЗ включає такі етапи.

На етапі попередньої обробки, системні виклики програми  $A$  впродовж запису її виконання створюють сліди виконання. Після цього для вхідного вектору обчислюється частота кожної послідовності  $n$  системних викликів у програмі  $A$ .

Як і в разі використання статичного аналізу, фаза машинного навчання починається з вибору та формування вхідного вектору. Щоби зменшити кількість вхідних послідовностей програми  $A$ , для аналізу вибирається тільки  $k$  послідовностей з найбільшим  $\delta_s$ :

$$\delta_s = \frac{\left| \frac{1}{|A_T|} \sum_{A \in A_T} f(A, s) - \frac{1}{|A_M|} \sum_{A \in A_M} f(A, s) \right|}{\max_{A_u} (A, s)},$$

де  $s$  – це кількість послідовностей системних викликів;  $A_u$  – об'єднаний набір з  $A_T$  та  $A_M$ .

Кількість вхідних послідовностей в подальшому зменшується шляхом визначення кожної послідовності  $s$ , обчислюється взаємна інформація  $I_s$  (ступінь взаємної залежності кількості послідовностей  $s$  між наборами  $A_T$  та  $A_M$ ) з  $f(A, s)$  і значенням  $A$  для будь-якого  $A \in A_u$ . Залишаються тільки послідовності з найвищим  $I_s$ , з яких отримується набір  $S$  з вибраних  $s$  послідовностей.

На етапі машинного навчання бінарний класифікатор (на основі SVM за законом розподілу Гауса та похибкою  $c=1$ ) навчається на основі наборів даних, отриманих з наборів  $A_T$  та  $A_M$ , а також вибраних послідовностей, визначених набором  $S$ .

На етапі класифікації попередньо вибрані послідовності програмних кодів вилучаються з програми до непоміченого набору даних, до яких застосовується натренований класифікатор. В результаті формується відповідь у вигляді {довірене ПЗ, шкідливе ПЗ}.

*Вхідні дані дослідження.*

Для дослідження використано набір із 7 000 програм, які порівню розділені на набір довірених  $A_T$  і набір шкідливих програм  $A_M$ . Набір довіреного програмного забезпечення був взятий з магазину Google Play, а набір шкідливого програмного забезпечення був взятий з Drebin dataset [13]. Також був сформований набір  $A_O$ , який включає набір обфускованого програмного забезпечення, із застосуванням техніки обфускації на програмному забезпеченні набору  $A_M$ . Під час динамічного аналізу кожна програма була запущена на реальному пристрої під управлінням Android OS щонайменше 1 хвилину. Для симуляції програмних викликів під час роботи програми відбувались випадкові взаємодії з інтерфейсом програми.

Для формування набору  $A_O$  були використані такі техніки морфінгу програмного коду:

- розбирання та перезбирання коду;
- перепакунання коду;
- зміна назви пакунку;
- перейменування ідентифікатора;
- кодування інформації;
- переспрямування програмних викликів;
- зміна порядку програмного коду;
- вставка «сміттєвого» коду.

Для спрощення оброблення результатів набори програм були розбиті на частини по 10 програм у кожній. Середні значення кожного набору були усереднені під час остаточного оброблення результатів.

*Оброблення результатів.*

Оброблення результатів проводиться у значенні точності правильно класифікованих програм: False Positive Rate (FPR) – відсоток довірених програм, що визначені як шкідливі; False Negative Rate (FNR) – відсоток шкідливих програм, що визначені як довірені; True Negative Rate (TNR) – відсоток довірених програм, що визначені як шкідливі; True Positive Rate (TPR) – відсоток довірених програм, що визначені як довірені.

Середні значення результатів TNR та TPR для тестового набору з 10 програм наведені на рис. 1.

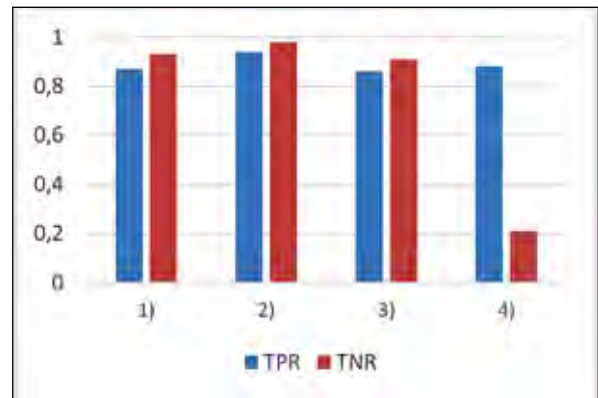


Рис. 1. Значення середнього TNR та TPR для тестового набору програм, де є такі складові: 1) обфусковане ПЗ/динамічний аналіз; 2) обфусковане ПЗ/статичний аналіз; 3) необфусковане ПЗ/динамічний аналіз; 4) необфусковане ПЗ/статичний аналіз

Середні значення FNR та FPR,  $\mu$  та стандартного відхилення  $\sigma$  FNR та FPR у двох сценаріях машинного навчання (на обфускованих та необфускованих шкідливих програмах) наведено в табл. 1.

Як видно з табл. 1, обидва методи виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі машинного навчання ефективні у класифікації необфускованих програм, FPR та FNR перебувають нижче 10%. При цьому, статичний аналіз є більш точним при FPR < 4% та FNR < 3%, тоді як динамічний аналіз показує FPR  $\approx$  10% та FNR  $\approx$  6% відповідно. На точність динамічного аналізу негативно вплинула наявність великої кількості виконуваних програмних викликів.

Аналізуючи різницю між FNR та FNR<sub>0</sub>, можемо дійти висновку, що на ефективність виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі статичного аналізу суттєво впливає обфускація, тоді як на ефективність виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі динамічного аналізу обфускація значно не впливає.

Для статичного методу FNR<sub>0</sub>  $\approx$  90%, тобто 9 з 10 програм зловмисних програм неправильно класифікуються як довірені. Це можна пояснити тим, що методи обфускації програмного коду, які використовуються в цьому дослідженні, сильно змінюють

Таблиця 1

Значення  $\mu$  та  $\sigma$  для FNR та FPR

Метод		FPR		FNR		FNR <sub>0</sub>	
		$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Обфусковане програмне забезпечення	Статичний	3,7	1,3	2,6	0,8	89,8	0,2
	Динамічний	9,9	1,0	5,8	1,4	7,5	0,3
Необфусковане програмне забезпечення	Статичний	6,6	1,8	0,6	0,1	0,1	0,1
	Динамічний	10,7	10	3,2	0,2	4,5	0,2

частоту та порядок операційних кодів у додатку, особливо під час переадресації системних викликів, впорядкування та вставки неприпустимого коду, що приводить до іншого розподілу послідовностей  $s$ , які більше не визначаються статичним класифікатором.

**Висновки.** У статті порівняно ефективність застосування методів виявлення обфускованого шкідливого програмного забезпечення на основі машинного навчання, що базуються на статичному або динамічному аналізі. Основне припущення в обох випадках полягає в тому, що обфускація коду додатка має залишити його трасування практично незмінним, що забезпечує надійність динамічного класифікатора під час обфускації, але повністю змі-

нює послідовність кодів операцій, що впливають з її коду, а також робить статичний класифікатор абсолютно неефективним.

Це припущення підтверджене застосуванням двох сучасних методів легітимізації додатків, програм зловмисного програмного забезпечення та шкідливих програм, які піддаються 8 різним методам морфінгу програмного коду. Результати показують, що виявлення шкідливого програмного забезпечення на основі статичного аналізу є неефективним при обфускованому шкідливому програмному забезпеченні, що можна покращити за рахунок надання доступу додекомпільованого програмного коду шкідливих програм для машинного навчання.

### Список літератури:

1. Number of available apps in Google Play. URL: <https://www.statista.com/statistics/266210/number-of-available-applications-in-the-google-play-store> (дата звернення: 28.11.2018).
2. Wang P., Bao Q., Wang L. Software Protection on the Go: A Large-Scale Empirical Study on Mobile App Obfuscation. URL: <https://faculty.ist.psu.edu/wu/papers/obf-i.pdf> (дата звернення: 28.11.2018).
3. Modern malware and threats. URL: [https://www.slideshare.net/MarketingArrowECS\\_CZ/modern-malware-and-threats](https://www.slideshare.net/MarketingArrowECS_CZ/modern-malware-and-threats) (дата звернення: 28.11.2018).
4. Гаврилов А.В. Применение постоянно модифицирующихся нейронных сетей для защиты программного обеспечения. *Нейрокомпьютеры, разработка, применение*. 2008. С. 90–101.
5. Obfuscation technics. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Obfuscation\\_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Obfuscation_(software)) (дата звернення: 28.11.2018).
6. Modern anti-malware software. URL: [https://stud.com.ua/62478/menedzhment/viyavlennya\\_virusiv\\_shkidlivih\\_program\\_usunennya](https://stud.com.ua/62478/menedzhment/viyavlennya_virusiv_shkidlivih_program_usunennya) (дата звернення: 28.11.2018).
7. Antivirus software. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Antivirus\\_software](https://en.wikipedia.org/wiki/Antivirus_software) (дата звернення: 28.11.2018).
8. Machine learning malware detection. URL: <https://media.kaspersky.com/en/enterprise-security/Kaspersky-Lab-Whitepaper-Machine-Learning.pdf> (дата звернення: 28.11.2018).
9. Метод відносних різниць. URL: [https://studme.com.ua/137311011620/menedzhment/metod\\_absolyutnyh\\_raznits.html](https://studme.com.ua/137311011620/menedzhment/metod_absolyutnyh_raznits.html) (дата звернення: 28.11.2018).
10. Artificial neural networks. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial\\_neural\\_network](https://en.wikipedia.org/wiki/Artificial_neural_network) (дата звернення: 28.11.2018).
11. Machine learning malware analysis. URL: <https://www.ccsinet.com/blog/machine-learning-malware-analysis> (дата звернення: 28.11.2018).
12. Dynamic analysis. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Динамічний\\_аналіз\\_коду](https://uk.wikipedia.org/wiki/Динамічний_аналіз_коду) (дата звернення: 28.11.2018).
13. Drebin dataset. URL: <https://www.sec.cs.tu-bs.de/~danarp/drebin> (дата звернення: 28.11.2018).

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОБФУСКАЦИИ ПРОГРАММНОГО КОДА НА ВЫЯВЛЕНИЕ ВРЕДОНОСНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

*Распространение вредоносного программного обеспечения на мобильных платформах мешает пользователям. С целью устранения необходимости применения механизма выявления вредоносного ПО на основе цифровой подписи достаточно использовать обыкновенную обфускацию программного кода. В статье предложены подходы к выявлению вредоносного программного обеспечения на основе машинного обучения, которые базируются на статическом и динамическом анализе.*

**Ключевые слова:** вредоносное программное обеспечение, Android, обфускация, безопасность, машинное обучение.

### IMPACT ANALYSIS OF SOFTWARE CODE OBFUSCATION ON MALWARE DETECTION

*The spread of malicious software on mobile platforms prevents users. In order to eliminate the need to use a mechanism for detecting malware based on a digital signature, it is sufficient to use ordinary code obfuscation. The article suggests approaches to detecting malware based on machine learning, which are based on static and dynamic analysis.*

**Key words:** malware, Android, obfuscation, security, machine learning.

УДК 519.651.2

**Слободяник А.Д.**

Вінницький національний технічний університет

**Коваль Л.Г.**

Вінницький національний технічний університет

**Гомолінський В.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Криворучко І.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Клапоушак А.Ю.**

Вінницький національний технічний університет

## ОСНОВИ ІНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ АПРОКСИМАЦІЇ ДАНИХ В ОПТОЕЛЕКТРОНІЦІ

*У статті розглядається можливість застосування інтервального аналізу під час графічного представлення експериментальних результатів у фізичному експерименті оптоелектроніки. Обрана тематика стосується оптики, зокрема явищ, що підтверджують хвильову природу світла і факт поперечних електромагнітних світлових хвиль. Представлені практичні результати можливості застосування методу апроксимації функції, коли функція задається таблично у вигляді масиву даних.*

**Ключові слова:** інтервальні дані, апроксимальна функція, оптоелектроніка, поляризація, інтерполяція.

**Постановка проблеми.** Інтенсивний розвиток обчислювальної техніки створив умови для побудови складних систем, де частка програмної складової частини суттєво перевищує частку апаратної. До таких систем відносять програмно-апаратні комплекси для екологічного моніторингу довкілля. Однією із задач, яку розв'язують вказані системи, є оцінювання просторового розподілу концентрацій шкідливих викидів хімічних речовин та співставлення їх із граничнодопустимими. Особливістю таких систем є наявність програмних модулів для моделювання процесів поширення шкідливих викидів на основі експериментальних даних, отриманих із застосуванням спектроаналізаторів, які характеризуються достатньо низькою точністю вимірювань. У цьому випадку апріорну невизначеність доцільно описувати в інтервальному вигляді, а побудову математичних моделей здійснювати на методах макромоделювання із застосуванням аналізу інтервальних даних.

У зв'язку з розвитком фізико-технічних досліджень у різних галузях науки і техніки, зокрема механіці, теплотехніці, оптиці, оптоелектроніці, літакобудівництві, виникла необхідність обчислення не тільки наближених рішень різноманіт-

них задач, але й гарантованих оцінок їх близькості до точних рішень. Використання методів інтервальної математики дозволяє представити опис невизначених даних та врахувати неточність результатів обчислювальних операцій.

Інтервальна арифметика, або інтервальний аналіз – це математична структура, яка для дійсних інтервалів визначає операції, аналогічні звичайним арифметичним. Цю область математики називають також інтервальним аналізом або інтервальними обчисленнями. Дана математична модель є зручною для дослідження різних прикладних об'єктів:

Величини, значення яких відомо тільки наближено, тобто визначений кінцевий інтервал, в якому ці значення знаходяться.

Величини, значення яких у ході обчислень змінені помилками заокруглення.

Випадкові величини.

Об'єкти і операції інтервальної арифметики можна розглядати як узагальнені моделі дійсних чисел, тому інтервали в ряді літературних джерел називають інтервальними числами. Практична важливість цієї моделі пов'язана з тим, що результати вимірювань і обчислень майже завжди мають деяку похибку, яку необхідно врахувати і оцінити.

Для ілюстрації правил виконання операцій класичної інтервальної арифметики розглянемо такі інтервальні числа:  $[a]=[a^-;a^+]$ ,  $[b]=[b^-;b^+]$ ,  $[c]=[c^-;c^+]$ . Позначимо за  $a, b, c$  дійсні числа, які належать до вказаних інтервалів відповідно. Тоді правило виконання операцій класичної інтервальної арифметики таке: «Якщо  $[c^-;c^+]=[a^-;a^+] \circ [b^-;b^+]$ ,  $a \in [a^-;a^+]$ ,  $b \in [b^-;b^+]$ , то  $a \circ b \in [c^-;c^+]$ , де символ  $\circ$  - означає арифметичну операцію із набору  $\{+, -, *, /\}$ ». Результати операцій додавання, віднімання, ділення та множення над інтервалами можна записати явно за допомогою таких формул:

$[a]+[b]=[a^-+b^-; a^++b^+]$ ,  $[a]-[b]=[a^- - b^+; a^+ - b^-]$ ,  $[a]/[b]=[a^- \cdot 1/b^+; 1/b^-]$ ,  $[a] \cdot [b]=[\min\{a^- \cdot b^-, a^- \cdot b^+, a^+ \cdot b^-, a^+ \cdot b^+\}; \max\{a^- \cdot b^-, a^- \cdot b^+, a^+ \cdot b^-, a^+ \cdot b^+\}]$ .

У методах інтервального аналізу враховують похибки у вхідних даних та похибки заокруглень на ЕОМ. У результаті всі дані набувають вигляду скінченних числових інтервалів.

Інтервалом називають замкнутий відрізок дійсної осі, а інтервальна невизначеність – це стан неповного (часткового) знання про величину, яка нас цікавить, коли відома її приналежність до деякого інтервалу, тобто коли ми можемо лише вказати границі можливих значень цієї величини (границі її зміни). Відповідно, інтервальний аналіз – це галузь математичного знання, яка досліджує задачі з інтервальними невизначеностями і методи їх розв'язування.

Існує і більш розгорнуте визначення інтервального аналізу. Кожна наукова дисципліна характеризується, як відомо, своїм окремим предметом і власним специфічним методом. Інтервальний аналіз – це розділ математики,

предметом якого є рішення задач з інтервальними невизначеностями і неоднозначностями в даних, які виникають або в умовах задачі, або в процесі її розв'язування;

характерною особливістю є розгляд множини невизначеності як самостійних цілісних об'єктів за рахунок встановлення арифметичних, аналітичних і т.д. операцій і відношень між ними.

Інтервальний аналіз і його специфічні методи мають, таким чином, найвищу цінність у задачах, де невизначеності і неоднозначності виникають із самого початку і являються невід'ємною частиною постановки задачі. Але це ні в якому разі не виключає інших плідних застосувань інтервального аналізу, зокрема в задачах, які формулюються взагалі без застосування поняття інтервалу. Наприклад, в останні роки інтервальний аналіз отримав широке застосування в якості основи для так званих доведень (достовірних, надійних)

обчислень на ЕОМ, обчислень із гарантійною точністю і т.д., не дивлячись на те, що в такому застосуванні інтервальні методи є лише тільки допоміжним засобом для розв'язування задач, неінтервальних за своєю природою.

Метод інтервального аналізу за своєю природою алгоритмічний і для доведення розв'язку вимагає реалізації на обчислювальній машині, тому не випадково, що в докомп'ютерну епоху розвиток інтервального аналізу не відбувся.

Однак вже всередині минулого століття у зв'язку з розвитком методів наближених обчислень і особливо з появою і поширенням перших ЕОМ потреба в інтервальному методі і оцінках тала досить гострою. Це свідчить про те, що перші роботи з інтервального аналізу з'явилися практично одночасно і незалежно в Радянському Союзі, США, Японії і Польщі.

Сучасний інтервальний аналіз і інтервальні методи спочатку виникли як засіб автоматичного врахування помилок округлень під час розрахунків із кінцевою точністю представлення чисел, зокрема, під час обрахунків на цифрових ЕОМ із кінцевою розрядною сіткою.

Однак ідеї, які покладені в основу нового наукового напрямку, виявились значно ширшими, ніж чисте заокруглення чисел. Досить швидко виявилось, що зароджуються нові інтервальні підходи і моделі, які отримують надзвичайно важливе застосування як мова запису деякого особливого класу невизначеностей, так званих обмежених за величиною невизначеностей.

Інтервальне представлення невизначеності стало привертати більшу увагу математиків і практиків експериментаторів тому, що воно є найменш обмеженим і відповідає широкому класу прикладних практичних задач, в яких часто немає основ або недостатньо інформації для того, щоб розглядати цю невизначеність як випадкову, тобто яка підлягає теоретично-ймовірнісним моделям. Інтервальний аналіз і створена практично одночасно з ним теорія нечітких множин з'явилися відповіддю на виклик практичних потреб, що бурхливо розвиваються і які вимагають розвитку апарату для врахування невизначеностей нестатистичної природи. При цьому інтервальний аналіз виявився здатним досліджувати змістовні моделі, які базуються на найбільш важливих припущеннях про характер невизначеності.

Характерною особливістю досліджень, в яких інтервальний аналіз використовується для доведень обчислень на цифрових ЕОМ із кінцевою розрядною сіткою (тобто для отримання математично

гарантованих результатів з врахуванням помилок заокруглення), є допущення про малі інтервали зміни вхідних даних, що дозволяє в багатьох випадках здійснювати асимптотичний аналіз і т.д. При цьому похибки обчислень необхідно враховувати в більшості операцій на ЕОМ, які формують остаточний результат. Суттєвий вплив на праці за цією тематикою здійснюють особливості обчислювальних машин і процесорів, їх архітектура, мови програмування і т.д.

Розглянуті задачі, пов'язані з моделюванням об'єктів за умов інтервальних даних, можуть бути розв'язані за допомогою інтервального підходу, теоретичною основою якого є інтервальні обчислення.

Основи інтервального аналізу були розроблені на вимогу часу як засіб урахування похибок під час розрахунків на ЕОМ і описані в монографії Р. Мура (R. Moore) за назвою «Intervalanalysis» у 1966 р. [1]. Перша праця серед вітчизняних вчених за даним напрямком була опублікована Канторовичем Л. В. у «Сибірському математичному журналі» у 1962 р. [2]. Основна ідея інтервальних обчислень полягає у представленні дійсного числа не одним машинним числом, а двома, які задають його гарантовані межі.

Усі задачі, які розв'язують із застосуванням інтервальних обчислень, можна поділити на дві групи [3, 4]: задачі з неточними – інтервальними даними та задачі з точними даними. Перші пов'язані з обчисленням множини розв'язків, а другі – з її поступовим уточненням. Прикладом задачі, яку відносять до першої групи, є задача розв'язування системи лінійних рівнянь з інтервальними коефіцієнтами. Для задач із точними даними інтервальний аналіз використовують у методах, які породжують послідовність меж, що збігаються до розв'язку. Прикладом таких задач є задача локалізації коренів нелінійного рівняння.

Значні проблеми виникають під час реалізації інтервальних обчислень, коли традиційні чисельні методи безпосередньо переносять на інтервальні числа. У результаті такого перенесення відбувається значне розширення результуючих інтервалів. Інші проблеми, які стосуються інтервальних обчислень, пов'язані з виконанням операції ділення на інтервали, які включають нуль. Унаслідок розширення інтервалів під час реалізації обчислень такі ситуації виникають достатньо часто. Проблеми, пов'язані із застосуванням класичної інтервальної арифметики, іноді можна розв'язати з використанням розширених інтервальних арифметик [5–10]. Ширина резуль-

туючого інтервалу в інтервальних обчисленнях залежить від порядку виконання операцій.

У роботі [11] розглянуто багатовимірну поліноміальну апроксимацію залежностей інтервальних даних. Проведено тестування програм на інтервальних та неінтервальних величинах для визначення ефективності підходу. Розроблений метод дозволяє підвищити точність у задачах оброблення експериментальних даних, заданих в умовах невизначеності.

У випадку табличної заданої функції перетворення для її апроксимаційного представлення переважно використовують інтерполяційні методи, частковим випадком яких є поліноміальна та раціональна інтерполяція. Інший варіант апроксимації – середньоквадратичне наближення, яке полягає в мінімізації квадратів відхилень від табличних даних. У випадку коли функція перетворення задана складним аналітичним виразом, для наближення застосовують розклад у ряд Тейлора або Фур'є. Найбільшою перевагою інтерполювання та середньоквадратичних наближень є порівняно невелика обчислювальна складність, що сприяє їх поширенню в багатьох застосуваннях. Однак досить часто під час обробки результатів вимірювань фізичних величин виникає необхідність побудови рівномірних наближень, які гарантують відхилення від представленої аналітичним виразом чи за допомогою таблиці функції на величину, що не перевищує заданого наперед значення.

З усіх існуючих методів наближень найменшу похибку на заданому інтервалі апроксимації забезпечує найкраще чебишовське наближення, яке шукається як розв'язок оптимізаційної задачі. Апроксимуючу функцію доцільно при цьому вибирати, виходячи з властивостей наближуваної функції. Тоді параметри апроксимуючого виразу обчислюють із умови мінімізації максимальної похибки на проміжку наближення.

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

Як правило, для наближень експериментальних залежностей використовують многочлени та раціональні многочлени. Цій тематиці присвячені роботи В.Б. Дудикевича, О.І. Лаушник, Я.Б. Попова. Однак використання поліноміального опису на практиці ускладнюється його обчислювальною громіздкістю, зумовленою високим порядком поліному. Але відомі цілі класи первинних термоперетворювачів (зокрема, арсенід-галієві та германієві термометри опору), градувальні характеристики яких є нелінійними, що зумовило застосування нелінійних чебишовських наближень, які розглядаються в роботах

Р.А. Воробеля, В.Б. Дудикевича, П.С. Малачівського, Б.О. Попова. Отже, для зазначених первинних перетворювачів оптимальними є наближуючі вирази, нелінійні відносно параметрів.

Питанням розроблення теорії і методів чисельного наближення функціональних залежностей многочленами, раціональними, нелінійними виразами та сплайн-функціями, а також застосуванню цих методів для розв'язування технічних задач присвячена значна кількість наукових праць Ю.С. Зав'ялова, М.П. Корнійчука, А.О. Лигуна, В.Н. Малоземова, Г. Мейнардуса, Дж. Ватсона, Є.Я. Ремеза, Б.О. Попова, Дж. Р. Райса, Г. С. Теслера та ін.

**Виклад основного матеріалу. Практична реалізація інтервального методу в оптичних дослідженнях.** У цій роботі розглядається можливість застосування інтервального аналізу під час графічного представлення експериментальних результатів у фізичному експерименті оптоелектроніки. Обрана тематика стосується оптики, зокрема явищ, що підтверджують хвильову природу світла і факт поперечних електромагнітних світлових хвиль. Відповідно до теорії будь-яке джерело світла є сукупністю дуже великого числа окремих незалежних випромінювачів світла (атомів, молекул або тих і інших одночасно). Згідно з електромагнітною теорією Максвелла світло є поперечною електромагнітною хвилею.

Результати експериментів щодо вивчення розповсюдження світла в різних середовищах дозволили встановити існування двох станів світла: природного та поляризованого.

Поляризованим є світло з переважним напрямком коливань: для одного з поперечних напрямків або для деякого напрямку повороту вектора напруженості електричного поля. Умовно розглядають тільки електричні коливання внаслідок більш важливої ролі електричного поля в більшості процесів, що відбуваються під час взаємодії світла з речовиною.

Поляризоване світло наочно зображують за допомогою проекційної картини – проекції вектора  $E$  на площину, перпендикулярну до променя (рис. 1). Якщо коливання вектора  $E$  відбуваються в деякій площині, то світло називається плоскополяризованим, або лінійно-поляризованим (рис. 1а).

Лінійно-поляризоване світло має нескінченну множину форм із різними азимутами  $\alpha$ . Якщо величина вектора  $E$  постійна в часі і його напрям змінюється так, що описує коло, то світло називається циркулярно-поляризованим (рис. 1б). Цей тип поляризації має дві форми, що відрізняються напрямом обертання вектора  $E$ .

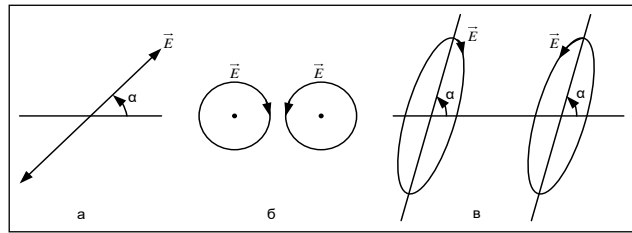


Рис. 1

Якщо величина вектора  $E$  змінюється за часом і кінець цього вектора описує еліпс, то світло називається еліптично-поляризованим (рис. 1 в). Воно має нескінченну множину форм, що відрізняються азимутом  $\alpha$ , ексцентриситетом і напрямом обертання.

Поляризоване світло за своєю природою є елементарним: монохроматичний промінь поляризованого світла вже неможливо розкласти на більш прості складові частини.

Монохроматичне світло є поляризованим. Однак будь-який реальний промінь світла завжди має помітний діапазон частот. Тому в ньому одночасно можуть мати місце різні форми поляризації. Поки що не знайдений задовільний спосіб наочного опису природного світла. Умовно прийнято зображати природне світло у вигляді зірочки з великим числом векторів  $E$ , але це зображення не відбиває найбільш важливих властивостей природного світла (рис. 2). Площина, в якій відбуваються коливання вектора  $E$ , називається площиною коливань. Площина, перпендикулярна до площини коливань, називається площиною поляризації.

Фізіологічна дія поляризованого світла на сітківку ока нічим не відрізняється від дії природного світла. Тому для вивчення його властивостей необхідні пристрої для його одержання і дослідження.

Пристрій, що дає можливість одержувати поляризовані промені, називається поляризатором, а пристрій, що дозволяє виявити наявність поляризованого світла, – аналізатором. Слід відмітити, що обидва ці пристрої можуть взаємозамінюватися.

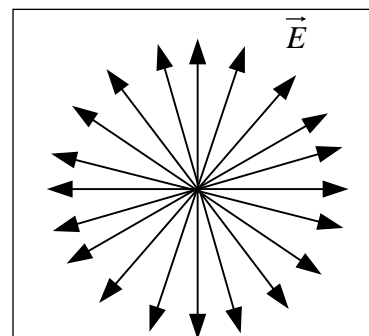


Рис. 2

Особливістю поляризатора і аналізатора є те, що вони можуть пропускати світлові хвилі, електричний вектор напруженості яких коливається лише у строго визначеному напрямі. Такий напрям називається головним.

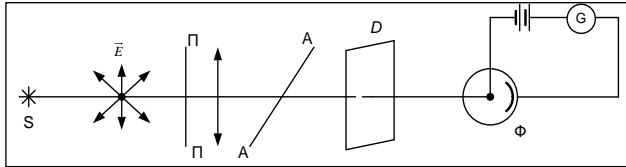


Рис. 3

Розглянемо установку (рис.3), що складається з джерела світла S, поляризатора П, аналізатора А, фотоелемента Ф, гальванометра G. Після проходження через поляризатор П світло стає плоскополяризованим. Аналізатор може пропускати тільки ті коливання  $\vec{E}$ , які збігаються з його головним напрямком AA. Якщо головні напрямки поляризатора ПП і аналізатора AA збігаються, то інтенсивність світла, що проходить через аналізатор А, буде максимальною.

Коли головні напрямки поляризатора і аналізатора утворюють між собою деякий кут  $\varphi$ , інтенсивність світла, що проходить, буде мати проміжне значення. Встановлений зв'язок між інтенсивністю променя, що проходить, і кутом  $\varphi$  виражається законом Малюса.

Ураховуючи, що інтенсивність коливань пропорційна квадрату амплітуди, маємо:

$$I = I_0 \cos^2 \varphi.$$

Це співвідношення виражає закон Малюса.

Графічно цей закон можна представити за допомогою математичного редактора Mathcad. Представлений результат показано у двох варіантах: 1) графік побудовано за аналітичною формулою  $I = I_0 \cos^2 \varphi$ , в якій значення кута  $\varphi$  задається з інтервалу  $[0..360^\circ]$ ,  $I_0$  відоме число; 2) графік будується за отриманими результатами, що занесені у відповідні масиви А і В.

Представлення випадку 1):

Представлення випадку 2) за отриманими результатами експерименту, які внесені до відповідних масивів:

Порівняння графіків, отриманих двома методами, дає можливість оцінювати точність експерименту. Для цього можна застосовувати різні методи апроксимації функцій.

**Апроксимація функцій. Поняття про наближення функцій.** Нехай величина «у» є функцією аргумента «х», тобто будь-якому значенню «х» з області визначення поставлено у відповідність значення «у».

На практиці досить часто бувають випадки, коли неможливо записати зв'язок між «х» та «у» у вигляді деякої залежності  $y = f(x)$ . Найбільш поширеним випадком, коли вид зв'язку між параметрами  $x$  та  $y$  невідомий, є задання цього зв'язку у вигляді таблиці  $\{x_i, y_i\}$ . Це означає, що дискретній множині значень аргумента  $\{x_i\}$  поставлена у відповідність множина значень функції  $\{y_i\}$  ( $i=0, n$ ). Цими значеннями можуть бути, наприклад, експериментальні дані. На практиці можуть бути потрібні значення величини  $y$  і в інших точках, відмінних від вузлів  $x_i$ . Однак одержати ці значення можна тільки експериментальним шляхом, що не завжди зручно і вигідно.

Із точки зору економії часу та засобів доцільно було б використати наявні табличні дані для наближеного обчислення шуканого параметра «у» при будь-якому значенні (з деякої області, звичайно) визначального параметра «х», оскільки точний зв'язок  $y = f(x)$  невідомий.

Цій меті служить задача про наближення (апроксимацію) функцій:

Цій меті служить задача про наближення (апроксимацію) функцій:

– дану функцію  $f(x)$  потрібно наближено замінити (апроксиму-

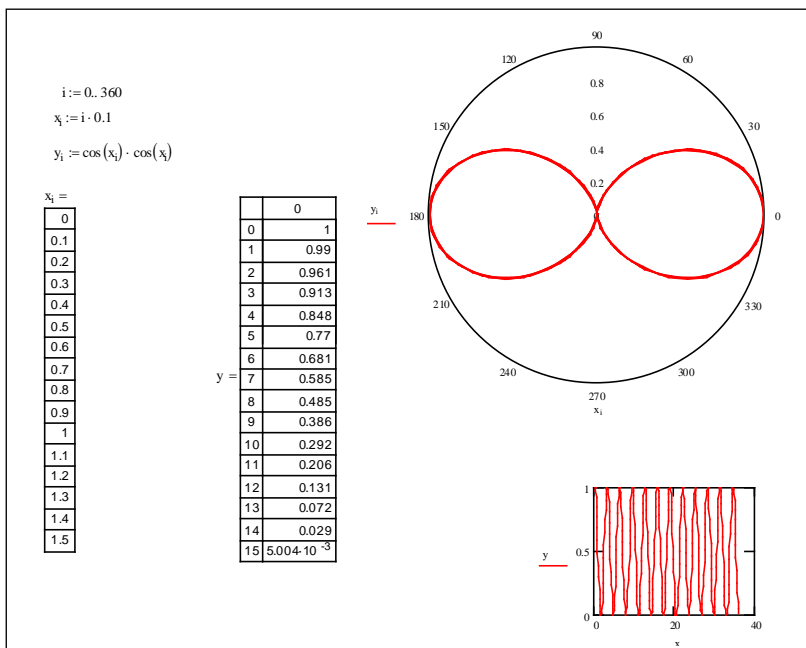


Рис. 4



вати) деякою функцією  $\varphi(x)$  так, щоб відхилення (в певному розумінні)  $\varphi(x)$  від  $f(x)$  в заданій області було найменшим. При цьому функція  $\varphi(x)$  називається апроксимуючою.

Наприклад, у тому випадку, коли функція  $f(x)$  задається у вигляді таблиці значень, задача апроксимації полягає в наступному: за табличними даними підібрати таку аналітичну залежність  $\varphi(x)$ , яка мала б просту структуру, згладжувала б особливості заданої експериментальної таблиці і найкращим чином відбивала б загальний хід зміни  $f(x)$  в середньому.

Тобто основна мета апроксимації – одержати швидкий (економний) алгоритм обчислення значень  $f(x)$  для значень  $x$ , що не містяться в таблиці даних. Основне питання апроксимації – як вибрати  $\varphi(x)$  і як оцінити відхилення  $\varphi(x)$  від  $f(x)$ .

На практиці досить часто  $\varphi(x)$  вибирається із класу алгебраїчних поліномів (многочленів)

$$\varphi(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (1)$$

Якщо початкова функція задана таблично, тобто на множині окремих точок, то апроксимація називається точковою. Якщо ж початкова функція задана на неперервній множині точок (наприклад, на відрізку  $[a; b]$ ), то апроксимація називається інтегральною (неперервною).

Одним із основних типів точкової апроксимації є інтерполяція. Вона полягає в наступному: для даної функції  $y = f(x)$  будуємо функцію  $\varphi(x)$ , яка в заданих точках  $x_i$  ( $i = \overline{0, n}$ ) приймає ті ж значення, що і функція  $f(x)$ , тобто

$$\varphi(x_i) = f(x_i),$$

а в решті точок відрізка  $[a; b]$  з області визначення  $f(x)$  наближено представляє  $f(x)$  з деякою похибкою. Точки  $x_i$  називають вузлами інтерполяції, а  $\varphi(x)$  – інтерполюючою функцією. Найчастіше інтерполюючу функцію  $\varphi(x)$  виражають через алгебраїчний многочлен степені  $m$ .

Середньо-квадратичне наближення. Степінь полінома  $m$  при цьому, як правило, значно менша від  $n$ . На практиці не вище 5,6. Мірою відхилення многочлена  $\varphi(x)$  від заданої функції  $f(x)$  на множині точок  $(x_i, y_i)$  ( $i = \overline{0, n}$ ) є величина  $S$ , яка дорівнює сумі квадратів різниць між значеннями многочлена та функції в даних точках

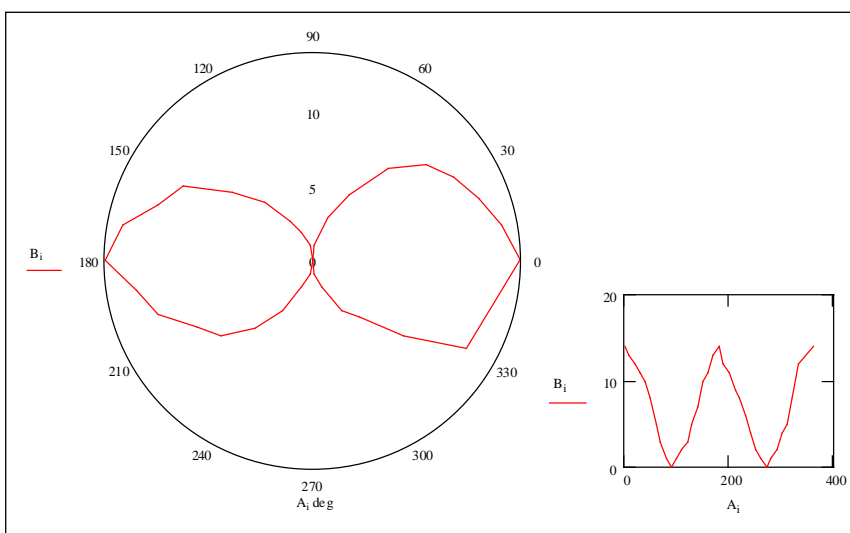


Рис. 5

$$S = \sum_{s=0}^n [\phi(x_i) - y_i]^2$$

Під час побудови апроксимуючого многочлена потрібно підібрати коефіцієнти  $a_0, a_1, \dots, a_m$  так, щоб величина  $S$  була мінімальною. У цьому полягає ідея методу найменших квадратів.

Рівномірне наближення. У багатьох випадках, особливо під час оброблення експериментальних даних, середньоквадратичне наближення зручне, оскільки воно згладжує деякі неточності функції  $f(x)$  і дає достатньо правильне уявлення про неї. Однак іноді ставиться більш жорстка умова і вимагається, щоб у всіх точках деякого відрізка  $[a, b]$  модуль відхилення многочлена  $\varphi(x)$  від  $f(x)$  був менший від деякого  $\varepsilon$

$$|f(x) - \varphi(x)| < \varepsilon, \quad a \leq x \leq b$$

У цьому випадку маємо рівномірну апроксимацію. Тепер введемо такі поняття. Абсолютним відхиленням  $\Delta$  многочлена  $\varphi(x)$  від функції  $f(x)$  на

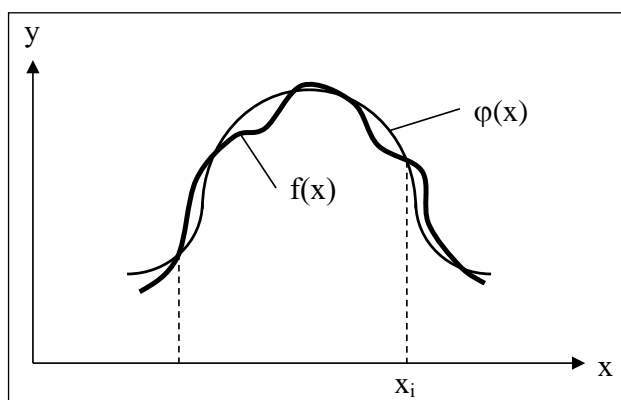


Рис. 6

відрізку  $[a, b]$  називається максимальне значення абсолютної різниці між ними на даному відрізку:

$$\Delta = \max |f(x) - \varphi(x)|, \quad a \leq x \leq b$$

За аналогією можна ввести середньоквадратичне відхилення

$$\bar{\Delta} = \sqrt{\frac{S}{n}}$$

На рисунку 7 показано відмінність цих двох видів наближень.

Рівномірне середньоквадратичне

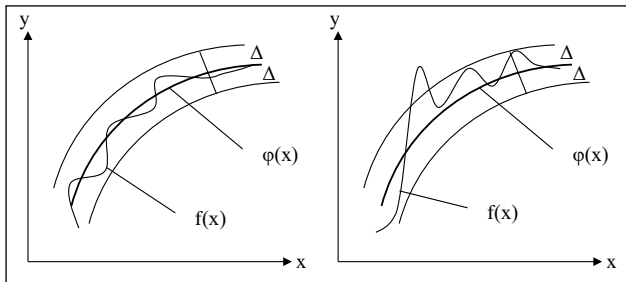


Рис. 7. Різні види наближень

Існує також поняття найкращого наближення функції  $f(x)$  многочленом  $\varphi(x)$  фіксованої степені  $m$ . У цьому випадку коефіцієнти многочлена  $a_0, a_1, \dots, a_m$  слід вибирати так, щоб на заданому відрізку  $[a, b]$  значення абсолютного відхилення  $\Delta$  було мінімальне. Многочлен  $\varphi(x)$  при цьому називається многочленом найкращого рівномірного наближення.

Таким чином, можна дати чітке означення процесу апроксимації і визначити похибку під час його застосування. Апроксимація (Approximation) взагалі – це наближений опис однією функцією (апроксимувальною) заданого вигляду іншої функції (апроксимованої), яка задається в будь-якому вигляді (у процесі апроксимації даних вона задається у вигляді масивів даних).

Існує два головних підходи до апроксимації даних [12; 13]. При одному з них вимагають, щоб апроксимувальна крива (можливо кусково-гладка) проходила через всі точки, які задані таблицею. Це можна зробити за допомогою методів інтерполяції, які були розглянуті вище. У випадку іншого підходу дані апроксимують простою функцією,

яка використовується при всіх табличних значеннях, але не обов'язково, щоб вона проходила через усі точки. Такий підхід зветься припасуванням кривої, яку прагнуть провести так, щоб її відхилення від табличних даних було мінімальним. Як правило, користуються методом найменших квадратів (МНК), тобто зводять до мінімуму суму квадратів різниць між значенням функції, яка визначена обраною кривою, та таблицею.

Нехай у таблиці задана  $(n-1)$  точка  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  і треба знайти апроксимувальну криву  $g(x)$  в діапазоні  $x_0 \leq x \leq x_n$  (рис. 6). У цьому випадку похибка в кожній табличній точці буде

$$\varepsilon_i = g(x_i) - y_i$$

Тоді сума квадратів похибок визначається виразом:

$$E = \sum_{i=0}^n [g(x_i) - y_i]^2$$

Таким чином, розкрита основна мета апроксимації – одержати швидкий (економний) алгоритм обчислення значень  $f(x)$  для значень  $x$ , що не містяться в таблиці даних. Представлена похибка та сума квадратів таких похибок під час застосування процесу апроксимації для масивів з інтервальними даними.

#### Висновки.

1. У роботі представлені можливості математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними та їх застосування до практичних потреб у фізичному експерименті з оптики та оптоелектроніки.

2. Представлені практичні результати можливості застосування методу апроксимації функції, коли функція задається табличною у вигляді масиву даних.

3. Запропоновано окреме розв'язання задачі апроксимації. Коли функція  $f(x)$  задається у вигляді таблиці значень, задача апроксимації полягає в наступному: за табличними даними підібрати таку аналітичну залежність  $\varphi(x)$ , яка мала б просту структуру, згладжувала б особливості заданої експериментальної таблиці і найкращим чином відбивала б загальний хід зміни  $f(x)$  в середньому.

#### Список літератури:

1. Moore R. E. Interval Analysis. Englewood Cliffs. Prentice Hall. 1966. 145 p.
2. Канторович Л.В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений. Сиб. математ. журнал. 1962. Т. 3. № 5. С. 701–709.
3. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. Москва : Мир, 1987. 360 с.
4. Калмыков С.А., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х. Методы интервального анализа. Новосибирск : Наука, 1986. 222 с.
5. Яковлев А.Г. Машинная арифметика мультиинтервалов. Вопросы Кибернетики (Научный Совет по компл. проблеме «Кибернетика» АН СССР). 1986. Вып. 125. С. 66–81.

6. Dimitrova N.S., Markov S.M., Popova E.D., Atanassova L., Herzberger J., eds. Extended interval arithmetics: new results and applications. Computer Arithmetic and Enclosure Methods. Amsterdam : Eisevier, 1992. P. 225–232.
7. Hansen E. R. Global optimization using interval analysis – the multidimensional case. *Numerische Mathematik*. 1980. Vol. 34. № 3. P. 247–270.
8. Markov S. M. Extended interval arithmetic involving infinite intervals. *Mathematica Balcanica. New Series*. 1992. Vol. 6. Fase. 3. P. 269–304.
9. Klatt P., Ullrichch. Complex sector arithmetic. *Computing*. 1980. Vol. 24. P. 139–148.
10. Lakeyev A.V. On the computational complexity of the solution of linear systems with moduli. *Reliable Computing*. 1996. Vol. 2. № 2. P. 125–131.
11. Дивак М.П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними. Тернопіль : Видавництво ТНЕУ «Економічна думка», 2011. 216 с.

#### **ОСНОВЫ ИНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ В ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ**

*В статье рассматривается возможность применения интервального анализа при графическом представлении экспериментальных результатов в физическом эксперименте оптоэлектроники. Выбранная тематика касается оптики, в частности явлений, подтверждающих волновую природу света и факт поперечных электромагнитных световых волн. Представлены практические результаты возможности применения метода аппроксимации функции, когда функция задается таблично в виде массива данных.*

**Ключевые слова:** интервальные данные, апроксимальная функция, оптоэлектроника, поляризация, интерполяция.

#### **BASIS OF INTERVAL ANALYSIS FOR DATA APROXIMATION IN OPTOELECTRONICS**

*The article considers the possibility of using interval analysis for graphical representation of experimental results in the physical experiment of optoelectronics. The chosen topics concern optics, in particular phenomena that confirm the wave nature of light and the fact of transverse electromagnetic light waves. Practical results of the possibility of applying the method of approximation of function are presented, when the function is given tabularly in the form of an array of data.*

**Key words:** interval data, approximation function, optoelectronics, polarization, interpolation.

УДК 004.5

**Тарасенко Я.В.**

Черкаський державний технологічний університет

**Каранетян А.Р.**

Черкаський державний технологічний університет

**Сінко О.М.**

Черкаський державний технологічний університет

## СОЦІОЛІНГВІСТИЧНИЙ АСПЕКТ ФОРМУВАННЯ ТЕКСТІВ У ПРОЕКТУВАННІ ЕРГОДИЗАЙНУ САЙТУ

*У статті вирішено проблему суміщення соціолінгвістичних методів та методів ергономіки у створенні дизайну веб-сайту. Розглянуто наявні методи формування текстової структури сайту. Проведено огляд поширених підходів до наповнення сайту текстовим контентом та оформлення цього контенту. Вибрано найбільш дієвий метод, який удосконалюється з використанням методів соціолінгвістики. На основі проведеного вдосконалення створено тестову сторінку, а також експериментально доведено її підвищену ефективність за допомогою методу, який засновується на відстеженні руху очей користувача. Крім того, надано рекомендації з можливого подальшого використання та вдосконалення наведеного соціолінгвістичного підходу до формування ергодизайну веб-сайту.*

**Ключові слова:** дизайн веб-сайту, юзабіліті сайту, наповнення сайту текстовим контентом, ергодизайн, соціолінгвістичний аспект, сканування сторінки користувачем.

**Постановка проблеми.** Сьогодні важко уявити світ без Інтернету. Інформація, що перебуває у вільному доступі, розміщена в певному середовищі, а саме на веб-сайтах. Однак, окрім проблеми дизайну, є також проблема ергономіки, а саме врахування особливостей діяльності користувача та його взаємодії з цим середовищем [1, с. 16].

Загалом ергодизайн – це орієнтована на людину науково-проектна діяльність, як зазначено в джерелі [2, с. 194]. Крім того, там описується основне завдання ергодизайну, що полягає у забезпеченні трьох аспектів проектування, таких як засоби та умови життєдіяльності людини, зручність, комфорт і краса.

Таким чином, можна стверджувати, що ергодизайн зумовлює юзабіліті сайту, тобто є ергономічною характеристикою ступеню зручності об'єкта [3, с. 416] (в цьому разі – веб-сайту).

Забезпечити юзабіліті текстової інформації повністю може лише соціолінгвістика. Як зазначається в джерелі [4, с. 29], соціолінгвістика розкриває характеристики мови щодо держави, політики, міста та багатьох інших аспектів, тобто саме дослідження соціолінгвістики може дати можливість враховувати ті властивості, що забезпечують належні умови праці, зручність користування сайтом не лише в лінгвістичному аспекті, адже правильно підібране й оформлене текстове наповнення

може спростити загальний дизайн сайту та видалити зайві структурні елементи.

На жаль, нині дуже мало досліджень присвячено науковому аспекту формування ергодизайну сайту, а ергономічним особливостям текстового контенту та інформаційній ергономіці приділялось недостатньо уваги. Як видно з графіку [5, с. 335], на якому порівнюється кількість публікацій з інформаційного ергодизайну із загальною кількістю публікацій, статті з інформаційного ергодизайну мають в середньому лише 1/6 від загальної кількості. Водночас саме лінгвістичний аспект майже не розглядається.

Отже, основна проблема зумовлюється необхідністю суміщення соціолінгвістичних методів та методів ергодизайну у створенні дизайну сайту, а саме в його наповненні текстовим контентом.

У статті висувається гіпотеза, що в разі поєднання методів соціолінгвістики та ергодизайну під час наповнення сайту текстовим контентом можна привернути увагу користувача до текстового наповнення, не вдаючись до нав'язливих підходів (контрастного виділення тексту, використання кольору), а також підвищити ефективність сприйняття інформації та юзабіліті сайту загалом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно з джерелом [6] існує декілька методів наповнення сайту контентом та формування його

структури, а саме метод питань, метод сортування карточок та метод фасетної класифікації. Також у статті описується, що сутність методу питань полягає в опитуванні клієнтів та складанні повного списку питань, що їх цікавлять, відповіді на які відображаються на сайті. Метод сортування карточок полягає у наданні опитуваним клієнтам змоги власноруч розділити карточки, на яких написані назви матеріалів сайту, по групах. Ці групи й будуть визначати структуру сайту. Метод фасетної класифікації базується на декількох різних класифікаціях, де поняття представлені у вигляді перетину низки ознак, що, як зазначено у статті, може підвищити зручність для користувача. Оскільки робота [6] присвячена наповненню сайту на основі вимог зацікавлених сторін, то, виходячи з визначення ергономічного дизайну, маємо змогу стверджувати, що розглянуті методи можна також віднести до методів створення ергономічного дизайну, хоча й лише опосередковано. Основні ж методи ергономічного дизайну, що також необхідні для створення ефективного ергономічного веб-сайту, описуються у джерелі [7].

Крім ергономічних властивостей, описані в роботі [6] методи частково володіють соціолінгвістичними властивостями, оскільки ґрунтуються на опитуванні клієнтів, але не є досконалими та дають можливість більшою мірою сформувати структуру сайту, а меншою мірою – його інформаційне, зокрема текстове, наповнення. Лише метод питань може дати можливість наповнення сайту текстовою інформацією, тому він буде взятий за основу в подальшому дослідженні для вдосконалення його соціолінгвістичної складової. Його недосконалість для виконання завдання текстового наповнення сайту полягає в обмеженості інформаційної складової. Це зумовлене перш за все тим, що під час його застосування можуть бути неточності та неправдиві дані. Опитування надто невеликої групи не дає змогу виявити закони та принципи формування текстової інформації, що безпосередньо цікавить відвідувачів. Дані ж соціолінгвістичної статистики набагато точніші та стосуються всіх аспектів життя й діяльності потенційної цільової аудиторії, а також прихованих психо-фізіологічних особливостей, що впливають на загальне ставлення відвідувача до тексту на сайті.

Щодо соціолінгвістичних підходів до формування текстів, то проблема соціальної диференціації мови порушується в праці [8]. Крім того, цьому питанню присвячена ще низка робіт [9–11].

**Постановка завдання.** Метою статті є вирішення завдання суміщення соціолінгвістичних

методів та методів ергономічного дизайну сайту на підставі вдосконалення методу питань у формуванні структури сайту шляхом впровадження та розширення в ньому соціолінгвістичного аспекту формування текстового контенту для підвищення ефективності сприйняття користувачем ергономічного дизайну сайту та покращення його юзабіліті.

Для досягнення мети слід вирішити такі завдання:

- визначення соціолінгвістичного аспекту формування текстів для наповнення сайту контентом;

- вдосконалення методу питань до формування структури сайту на підставі соціолінгвістичного аспекту;

- підтвердження чи спростування гіпотези про підвищену ефективність сприйняття інформації та юзабіліті сайту загалом.

### **Виклад основного матеріалу дослідження.**

Перш за все соціолінгвістичний аспект формування тексту полягає у виконанні низки вимог. Окрім питань, що цікавлять кінцевого споживача (в цьому разі – користувача веб-ресурсу), необхідним фактором є їх правильне оформлення в лінгвістичному аспекті. У джерелі [8] зазначено такі характеристики, що можуть визначати соціолінгвістичний аспект формування текстового контенту. Перш за все використання сленгу, не у звичній інтерпретації значення цього терміна, а саме з огляду на використання мовних категорій, що прийняті у соціальній групі очікуваної цільової аудиторії веб-сайту. Наступним, що слід відзначити, є врахування вікової групи, матеріального становища, освіти, професійної діяльності та географічного розташування цільової аудиторії. Це дасть змогу будувати речення та структуру тексту з використанням граматичних та лексичних конструкцій, які є звичними та прийнятними для користувачів сайту, отже, зможуть зацікавити та задовольнити їх психофізіологічні потреби, а це забезпечить ергономічні характеристики тексту. Крім того, фізіологічні особливості мови зумовлюються гендерною диференціацією цільової аудиторії. Звідси випливає, що, наприклад, жінки під час сприйняття текстової інформації орієнтуються на емоційну складову, а чоловіки – на прагматичну, тому текст має бути побудований з огляду на цей факт, тобто за умови одночасного врахування вікових, соціальних чи політичних факторів, оскільки, зокрема, сучасна жінка володіє такими психологічними якостями, як самодостатність та активність [8]. Це також впливає на ергономічність тексту. Цими характеристиками зумовлюється соціолінгвістичний аспект. Водночас

ці характеристики визначені соціологами та описані в достатній кількості наукових джерел.

Як вже зазначалось, метод питань [6] є найбільш ефективним саме для розв'язання задачі наповнення сайту текстовим контентом, однак він має низку перелічених раніше недоліків. Звідси випливає, що для підвищення ефективності тексту та покращення його ергономічних властивостей необхідно вдосконалити його соціолінгвістичну складову. Це дасть змогу не лише автоматизувати процес опитування клієнтів, але й значно скоротити час, витрачений на опитування, а також розширити категоріальний апарат і сферу охоплення питань.

Загалом забезпечення наповнення веб-сайту текстовим контентом за розглянутого методу можна зобразити схематично за формулою:

$$Cont_1 = (b \cdot \frac{c}{c'}) + d, \quad (1)$$

де  $Cont_1$  – текстовий контент сайту;  $b$  – кількість опитаних;  $c$  – загальна кількість питань;  $c'$  – кількість правдивих відповідей;  $d$  – візуальне оформлення тексту.

Як можна побачити, такий метод володіє великою кількістю змінних, які перебувають у взаємній залежності. Невизначеність спричиняє неточність результатів та недостатність прогнозованості результатів, отже, неможливість впливати на остаточний результат.

Пропонується покращити ефективність цього методу, що схематично можна зобразити такою формулою:

$$Cont_2 = g + d, \quad (2)$$

де  $Cont_2$  – текстовий контент сайту, розроблений за запропонованого підходу;  $g$  – соціолінгвістична характеристика;  $d$  – візуальне оформлення тексту.

Таким чином, змінні замінюються константою  $g$ . Оскільки велика кількість лінгвістичних характеристик вже визначена соціологами та є відомою, а до опитування було залучено значно більшу кількість людей, апроксимація статистичних результатів може дати значно точніше значення, отже, більш універсальне. Таким чином, цей підхід може спростити процес визначення ключових характеристик, що задовольняють психофізіологічні потреби кінцевого користувача для середніх та великих інтернет-ресурсів та порталів, хоча ефективність дещо знижена для сайтів з дуже незначною кількістю відвідувачів.

Підтвердити ефективність запропонованого вдосконалення можна лише шляхом порівняння статистичних даних сканування користувачами текстового контенту веб-сайту, розробленого за допомогою базового методу питань та його вдосконаленого варіанта. Крім того, це дасть змогу підтвердити висунуту у статті гіпотезу про можливість підвищену ефективність сприйняття інформації та юзабіліті сайту загалом в разі застосування соціолінгвістичного аспекту під час наповнення сайту текстовим контентом.

Експеримент проведено із залученням студентів-веб-дизайнерів першого курсу. Реципієнтам було запропоновано просканувати очима дві сторінки (перша розроблена за допомогою базового методу питань, друга – на основі вдосконаленого методу на підставі соціолінгвістичного аспекту). Метод питань виявив, що потенційну цільову аудиторію (реципієнтів) цікавлять питання, пов'язані з дозвіллям, подорожами та проведенням вільного часу. Дизайн сторінок розроблено за допомогою онлайн-конструктору сайтів "WIX". За основу взято стандартний шаблон

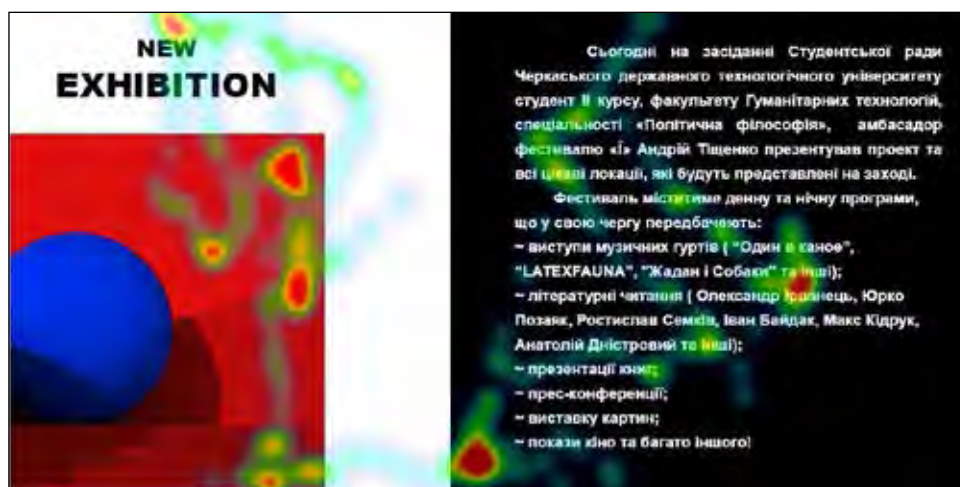


Рис. 1. Теплова карта сканування реципієнтами сторінки 1

дизайну із запропонованих конструктором, однак це не впливає на результат, оскільки досліджено саме текстовий контент. Задля чистоти експерименту загальний дизайн сайту в обох випадках був однаковим, а виняток становив лише сам текст у другому варіанті, який був форматований згідно з вимогами соціолінгвістики з використанням підкреслень чи виділень курсивом. Текстове наповнення взято з новин сайту університету в чистому вигляді в першому випадку, а також змінено згідно із соціолінгвістичним аспектом, продиктованим психофізіологічними особливостями досліджуваної групи людей та питаннями, що були поставлені для визначення зацікавленості цільової аудиторії. Дослідження процесу сканування сайту проводилося за допомогою програмного забезпечення “SentiGaze”, що дає змогу відстежувати рухи очей користувача та будувати теплову карту місць, що найбільше його зацікавили.

Об’єднаний результат сканування всіма реципієнтами сторінки, розробленої з використанням базового методу питань, зображений на тепловій карті (рис. 1).

Як можна побачити, студентів текст зацікавив лише опосередковано й майже не читався. Увагу привернули лише заголовки та елементи дизайну. Сам же текстовий контент було проглянуто поверхнево з деякими виключеннями, такими як, наприклад, назва музичного гурту чи ім’я літературного діяча.

Зовсім інша ситуація була виявлена на тепловій карті (рис. 2), побудованої в ході дослідження сторінки, розробленої на основі вдосконаленого методу на підставі соціолінгвістичного аспекту. В цьому випадку текст читався набагато ретельніше

та вдумливіше. Увага була звернута на майже всі аспекти, висвітлені в тексті, тоді як дизайну сторінки та яскравим акцентним структурним елементам уваги приділялося значно менше, ніж у першому варіанті, що дає змогу спростити розроблення дизайну сайту за умови збереження ергономічних властивостей та підвищення юзабіліті.

Таким чином, можна стверджувати, що гіпотеза, висунута на початку статті, частково підтвердилася. Зокрема, справді в разі поєднання методів соціолінгвістики та ергодизайну під час наповнення сайту текстовим контентом можна привернути увагу користувача до текстового наповнення, не вдаючись до нав’язливих підходів до дизайну, а також підвищити ефективність сприйняття інформації та юзабіліті сайту загалом, однак форматування тексту та його візуальне оформлення також є складовими соціолінгвістичного аспекту, тому повинні бути присутні для повноцінного проектування ергодизайну сайту.

**Висновки.** У статті надано один зі шляхів вирішення проблеми суміщення соціолінгвістичних методів та методів ергономіки під час створення ергодизайну сайту, а саме його текстового наповнення.

Було вдосконалено соціолінгвістичну складову методу питань у формуванні структури сайту на підставі наведеного соціолінгвістичного аспекту формування текстової інформації шляхом врахування психофізіологічних потреб користувачів, що дає змогу впровадити закони ергономіки в текстове наповнення веб-сайту.

В результаті експериментального дослідження ефективності вдосконалення доведено підвищену ефективність сприйняття інформації та юзабіліті сайту загалом, отже, гіпотеза, висунута у статті,

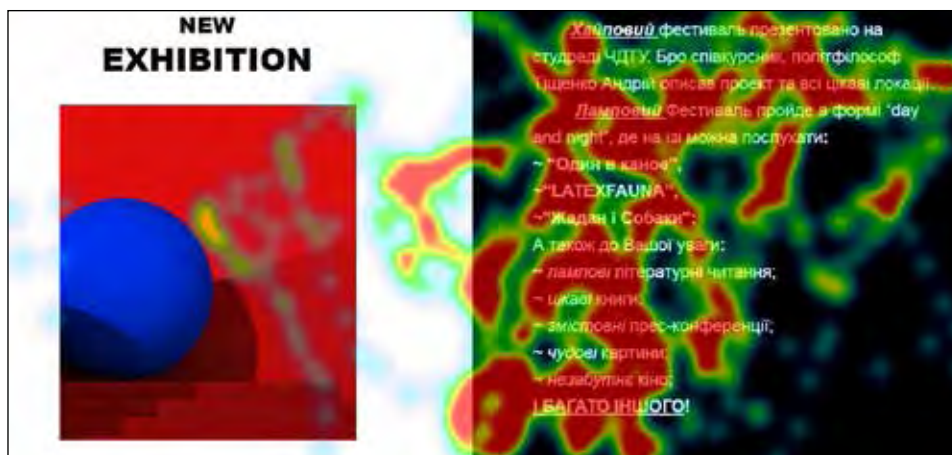


Рис. 2. Теплова карта сканування реципієнтами сторінки 2

частково підтвердилась, а саме можливість повернення уваги користувача до текстового наповнення без нав'язливих підходів до дизайну.

Отримані результати дають можливість підвищити ефективність сприйняття текстової

інформації користувачем, мінімізації візуальної складової загального дизайну сторінки під час проектування ергономічного сайту для більш ефективного використання виділених ресурсів серверу.

#### Список літератури:

1. Голобородько В.М., Опалев М.Л. Формування дизайн-ергономічних вимог до користувацького інтерфейсу web-сайтів. *Вісник ХДАДМ*. 2011. № 3. С. 16–19.
2. Захарчук М.Г. Эргономический дизайн – инновационная технология. *Архитектон: известия вузов*. 2013. № 41. С. 194–205.
3. Никишкин В.В., Твердохлебова М.Д., Воронова Т.А. Интегральная оценка юзабилити сайтов: на примере интернет-магазинов ювелирных изделий. *Актуальні проблеми економіки*. 2016. № 8. С. 415–420.
4. Мацюк Г.П. Соціолінгвістика як інтеграційний напрям досліджень в умовах сучасної парадигми: міжнародний досвід й українська перспектива. *Наукові записки НаУКМА*. 2012. Т. 137: Філологічні науки. С. 28–34.
5. Paschoarelli L.C., Silva J. et al. Brazilian Research Panorama on Information Ergonomics. *Design, User Experience, and Usability* : proceedings of IV international conference (Los Angeles, USA, 2–7 August 2015). Switzerland, 2015. P. 2. P. 330–340.
6. Бедрина С.Л., Маслюк А.В., Леонова А.А. Методика разработки структуры и наполнения сайта организации, основанная на требованиях заинтересованных сторон. *Фундаментальные исследования*. 2015. № 7. Ч. 1. С. 106–110.
7. Эргономический дизайн. Основы методологии и практики / за заг. ред. В.О. Свірка. Київ : Школа, 2009. 270 с.
8. Мощева С.В. Социолингвистический аспект текстов масс-медиа (на материале русско- и англоязычных текстов). *Вестник НГУ. Серия: История. Филология*. 2013. Т. 12. Вып. 10 : Журналистика. С. 135–140.
9. Мощева С.В. Выразительный потенциал текстов масс-медиа. Анализ языковых уровней : монография. Saarbrücken, Germany : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 144 с.
10. Simaki V., Megalooikonomou V., Mporas I. Evaluation and sociolinguistic analysis of text features for gender and age identification. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 9. Iss. 4. P. 868–876.
11. Turell M.T. The use of textual, grammatical and sociolinguistic evidence in forensic text comparison. *International journal of speech language and the law*. 2010. Vol. 17. № 2. P. 211–250.

#### СОЦИОЛИНГВИСТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕКСТОВ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭРГОДИЗАЙНА САЙТА

В статье решена проблема совмещения социолингвистических методов и методов эргономики в создании дизайна сайта. Рассмотрены существующие методы формирования текстовой структуры сайта. Проведен обзор распространенных подходов к наполнению сайта текстовым контентом и оформлению этого контента. Выбран наиболее действенный метод, который совершенствуется с использованием методов социолингвистики. На основе проведенного совершенствования создана тестовая страница, а также экспериментально доказана ее улучшенная эффективность с помощью метода, который основывается на отслеживании движения глаз пользователя. Кроме того, предоставлены рекомендации по возможному дальнейшему использованию и совершенствованию приведенного социолингвистического подхода к формированию эргономического дизайна веб-сайта.

**Ключевые слова:** дизайн сайта, юзабилити сайта, наполнение сайта текстовым контентом, эргономический дизайн, социолингвистический аспект, сканирование страницы пользователем.

#### SOCIOLINGUISTIC ASPECT OF TEXTS' FORMATION IN THE SITE'S ERGO DESIGNING

The article solves the problem of combining sociolinguistic methods and methods of ergonomics in designing a website. The existing methods of forming the site's textual structure are considered. An overview of common approaches in filling the website with textual content and the design of this content was made. The most effective method was chosen and it was improved using the methods of sociolinguistics. On the basis of the improvement, a test page was created and its improved efficiency was experimentally proven with help of a method based on tracking the user's eye movement. In addition, the recommendations on the possible further use and improvement of the reviewed sociolinguistic approach for the website's ergo designing are given.

**Key words:** website design, usability of the website, filling the website with textual content, ergo design, sociolinguistic aspect, page scanning by the user.



УДК 004.056.5

**Терейковська Л.О.**

Київський національний університет будівництва і архітектури

**Терейковський О.І.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВА МОДЕЛЬ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕМОЦІЙ ПО ЗОБРАЖЕННЮ ОБЛИЧЧЯ

*Стаття присвячена розробленню нейромережевої моделі, що дає змогу реалізувати розпізнавання емоцій на підставі зображення обличчя людини під час впливу завад, характерних для інформаційних систем загального призначення. Визначена низька пристосованість поширених рішень на базі згорткових нейронних мереж до нівелювання такої характерної завади, як поворот обличчя на зображенні, що підлягає аналізуванню. Запропоновано виправити вказаний недолік за рахунок застосування капсульної нейронної мережі, що є розвитком згорткових нейронних мереж щодо розпізнавання зашумлених зображень. Розроблено відповідну нейромережеву модель, ефективність якої доведена експериментально. Показано, що перспективи подальших досліджень щодо нейромережевого розпізнавання емоцій по геометрії обличчя можуть бути пов'язані з удосконаленням архітектурних рішень капсульної нейронної мережі задля зменшення кількості навчальних ітерацій під час забезпечення прийнятної похибки розпізнавання.*

**Ключові слова:** емоційний стан, базові емоції, зображення обличчя, нейромережева модель, капсульна нейронна мережа.

**Постановка проблеми.** Сьогодні засоби автоматичного розпізнавання емоцій на базі геометрії обличчя людини знайшли широке застосування в різноманітних сферах людської діяльності. До переваг вказаних засобів відносять порівняно високу точність класифікації, апробованість, низьку вартість та поширеність зчитувальних пристроїв (відеокамер). Водночас практичний досвід і результати науково-прикладних робіт [2–4] вказують на необхідність суттєвої модернізації сучасних засобів розпізнавання задля зменшення ресурсоемності, збільшення точності розпізнавання, скорочення терміну розроблення та підвищення адаптації до багатьох особливостей сучасних інформаційних систем (ІС). Разом з використанням більш ефективного апаратного забезпечення одним з основних напрямів модернізації є вдосконалення математичного забезпечення процесу розпізнавання [3; 5–8], що зумовлює актуальність досліджень у цьому напрямі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасній психології виділяють сім базових емоцій, мімічні прояви яких не залежать від раси та культури людини [1; 4]. Базові емоції – це елементарні емоції, які більше ні на що не розщеплюються й самі є складовими інших складних емоцій. До базових емоцій належать радість, гнів, відраза, смуток, страх, подив, презирство та ней-

тральність. Зазначимо, що в деяких роботах [5] виділяють не вісім, а чотири базових емоції, таких як щастя (радість), смуток (сум), переляк (страх), здивування, гнів/огида. При цьому кількість та номенклатура складних (складових) емоцій досі чітко не визначена, а відповідна теорія далека від досконалості.

Базою аналізу поточного стану розробок щодо розпізнавання емоцій на основі геометрії обличчя людини послужили роботи [1–6; 8–11], в яких описані як апробовані рішення, так і сучасні підходи до цього. Так, у джерелі [1] запропоновано варіант реалізації системи розпізнавання емоційного стану для підтримки спілкування людини із сервісними антропоморфними роботами. Зазначено, що суттєвою перешкодою під час розроблення систем розпізнавання емоцій є обмеженість доступних баз даних, а також висока частка індивідуальних особливостей у прояві тієї чи іншої емоції у різних людей. Це істотно підвищує вимоги до узагальнюючих можливостей застосовуваних методів машинного навчання. Крім цього, на точність розпізнавання суттєво впливають зміна положення обличчя на зображенні, наявність окулярів та макіяжу, зачіска. Для нівелювання цих труднощів пропонується використовувати різні алгоритми локальної фільтрації зображення під час визначення інформативних ознак особи, а оцінювання ступеня

вираження емоцій можна розраховувати за допомогою мультикласифікатора. Розроблена у джерелі [5] система дає змогу розпізнавати сім базових емоцій на підставі відфільтрованих локальних ознак ступеня вираження двадцяти ознак (AU), що входять у систему кодування FACS, розроблену П. Екманом. Для розпізнавання використовуються три класифікатори, а саме ймовірнісний класифікатор, багатшаровий перцептрон та система логічних правил. Підсумковий ступінь вираження емоції розраховується як сума відгуків ймовірнісного класифікатора та нейронної мережі (НМ). Логічні правила використовуються тільки для вирішення спірних ситуацій, коли кілька емоцій отримують однакову високу оцінку ступеня вираження. Задекларована точність розпізнавання складає 85%. У джерелах [2; 3] комбінуються кілька типів ознак із подальшою класифікацією методом опорних векторів. Автори [11] декларують можливість значного підвищення точності розпізнавання за рахунок використання як ознак просторово-часової модифікації локальних бінарних шаблонів. В роботі [3] продемонстровано алгоритм розрахунку інтенсивності AU і зіставлення ефективності різних груп ознак та їх об'єднань. Цікавий підхід до класифікації запропонований у праці [4], де ступені вираження AU перетворюються на маркери наявності емоцій за допомогою логічних дерев рішень, специфічних для різних етнічних груп.

Також проведений аналіз дає змогу стверджувати, що сьогодні найбільш ефективними вважаються нейромережеві засоби розпізнавання емоцій. При цьому НМ можуть використовуватись для розпізнавання емоцій на підставі як аналізу характерних точок обличчя, так і цілісного порівняння зображення обличчя особи з деякими еталонами. Як правило, базою сучасних рішень є згорткові

нейронні мережі (ЗНМ) різної архітектури. Інші типи НМ менш ефективні як щодо точності розпізнавання, так і стосовно ресурсоемності. Крім ЗНМ, у засобах розпізнавання для врахування часової складової використовуються рекурентні НМ типу LSTM [4]. Водночас дані джерел [6; 8; 11] вказують на необхідність підвищення рівня адаптації сучасних НМ розпізнавання емоцій до типових завдань, що виникають під час розпізнавання обличчя в ІС загального призначення.

**Постановка завдання.** Метою статті є розроблення нейромережевої моделі, що дає змогу реалізувати розпізнавання емоцій на підставі геометрії обличчя людини під час впливу завдань, характерних для інформаційних систем загального призначення.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Проведемо деяке уточнення постановки завдання розпізнавання емоцій. Припустимо необхідність розпізнавання тільки базових емоцій на підставі статичних зображень обличчя, зафіксованого за допомогою відеокамери із середніми характеристиками. При цьому питання розпізнавання особистості, попередньої фільтрації зображення, впливу освітленості, виділення на зображенні окремих осіб та нівелювання свідомого спотворення обличчя людини задля приховування нею свого емоційного стану не розглядаються. Результати [2; 5] вказують на те, що в цьому разі в ІС загального призначення основні перешкоди виникають в результаті повороту обличчя людини. Відповідно до джерел [7; 11] нівелювати вказану перешкоду можна за рахунок використання моделі на базі капсульної НМ (CapsNet), яка є модифікацією ЗНМ, пристосованої до аналізу повернутих та зашумлених зображень. Структура мережі CapsNet, що адаптована до завдання розпізнавання емоцій, показана на рис. 1.

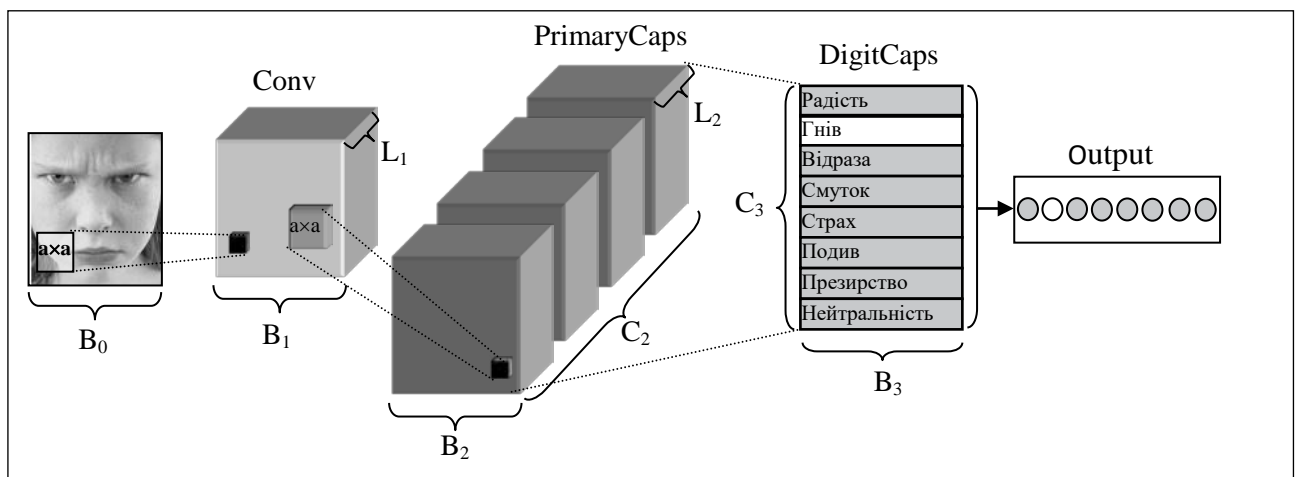


Рис. 1. Структура CapsNet

Основними структурними одиницями CapsNet є вхідний шар нейронів (відповідає вхідному зображенню), згортковий шар (Conv), шар первинних капсул (PrimaryCaps), шар згорткових капсул (DigitCaps), кожна з яких відповідає одній з базових емоцій. Зазначимо, що, на відміну від класичної капсульної мережі [11], у CapsNet, показаний на рис. 1, блок декодування відсутній. На рис. 1 використані такі позначення, які відповідають структурним параметрам мережі:  $V_0$  – вертикальний та горизонтальний розмір аналізованого зображення;  $V_1$  – розмір карт ознак у шарі Conv;  $V_2$  – розмір сітки в шарі PrimaryCaps;  $V_3$  – кількість одиниць згортки в кожній капсулі шару DigitCaps;  $C_2$  – кількість каналів у шарі PrimaryCaps;  $C_3$  – кількість капсул у шарі DigitCaps;  $L_1$  – кількість карт ознак у шарі Conv;  $L_2$  – кількість одиниць згортки в кожному каналі шару PrimaryCaps;  $a$  – розмір ядра згортки. Аналогічно до класичної капсульної мережі розмір ядра згортки  $a = 9$ , крок ядра згортки для Conv  $d_1 = 1$ , крок ядра згортки для PrimaryCaps  $d_2 = 2$ , кількість карт ознак  $L_1 = 256$ , кількість каналів PrimaryCaps  $C_2 = 32$ , кількість одиниць згортки в PrimaryCaps  $L_2 = 8$ , кількість одиниць згортки в кожній капсулі DigitCaps  $V_3 = 8$ . Розмір вхідного зображення  $V_0 = 48$ , розмір карт ознак  $V_1 = 41$ , розмір сітки  $V_2 = 17$ , кількість капсул у DigitCaps дорівнює кількості емоцій, що мають бути розпізнані,  $C_3 = 8$ .

Розрахунок вхідних та вихідних сигналів для нейронів у Conv здійснюється так само, як і в згортковій нейронній мережі. При цьому використовується функція активації ReLU:

$$y = \max(0, x), \quad (1)$$

де  $x$  – сумарний вхідний сигнал нейрона;  $y$  – вихідний сигнал.

Вхідний сигнал нейрона в шарі Conv розраховується так:

$$x_k^{(i,j)} = x_{0,k} + \sum_{s=1}^a \sum_{t=1}^a w_{k,s,t} x^{(i+s,j+t)}, \quad (2)$$

де  $x_k^{(i,j)}$  – вхідний сигнал  $(i,j)$ -го нейрона  $k$ -ї карти ознак;  $x_{0,k}$  – зсув нейронів  $k$ -ї карти ознак;  $a$  – розмір ядра згортки;  $w_{k,s,t}$  – ваговий коефіцієнт  $(s,t)$ -го зв'язку нейрона  $k$ -ї карти ознак;  $x_0^{(i,j)}$  – вхідний сигнал  $(i,j)$ -го нейрона вхідного шару.

Розрахунок вхідних та вихідних сигналів капсул реалізується так:

$$v_j = \frac{\|s_j\|^2}{1 + \|s_j\|^2} \frac{s_j}{\|s_j\|}, \quad (3)$$

$$s_j = \sum_{i=1}^{C_3} (c_{i,j} \hat{u}_{j|i}), \quad (4)$$

$$\hat{u}_{j|i} = W_{i,j} u_i, \quad (5)$$

$$c_{i,j} = \exp(b_{i,j}) / \sum_{k=1}^{C_3} \exp(b_{i,j}), \quad (6)$$

$$\Delta b_{i,j} = v_j \hat{u}_{j|i}, \quad (7)$$

$$b_{i,j} = b_{i,j} + \Delta b_{i,j}, \quad (8)$$

де  $v_j$  – вхідний вектор  $j$ -ї капсули в шарі DigitCaps;  $s_j$  – складова  $j$ -ї капсули шару DigitCaps у вихідному сигналі мережі;  $c_{i,j}$  – ваговий коефіцієнт узгодженості між  $i$ -ю капсулою в шарі PrimaryCaps та  $j$ -ю капсулою в шарі DigitCaps;  $\hat{u}_{j|i}$  – прогнозована величина вихідного сигналу  $i$ -ї капсули в шарі PrimaryCaps;  $W_{i,j}$  – матриця вагових коефіцієнтів зв'язків між  $i$ -ю капсулою в шарі PrimaryCaps та  $j$ -ю капсулою в шарі DigitCaps;  $b_{i,j}$  – логарифм ймовірності зв'язку між  $i$ -ю капсулою в шарі PrimaryCaps та  $j$ -ю капсулою в шарі DigitCaps;  $u_i$  – вихідний сигнал  $i$ -ї капсули в шарі PrimaryCaps;  $\mathcal{O}_{i,j}$  – коефіцієнт корекції при ітеративному розрахунку  $b_{i,j}$ .

Відзначимо, що вираз виду (3) є так званою squash-функцією, а вираз виду (6) – функцією softmax. Процес навчання CapsNet полягає в мінімізації функціоналу:

$$\sum_{k=1}^K E_k \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$E_k = T_k \max(0, m^+ - \|v_k\|)^2 + \lambda (1 - T_k) \max(0, \|v_k\| - m^-)^2, \quad (10)$$

де  $K = C_3$  – кількість капсул у шарі PrimaryCaps.

При цьому для капсули, яка відповідає  $k$ -й емоції,  $T_k = 1$  тільки тоді, якщо на зображенні обличчя ця емоція відображається. Інакше  $T_k = 0$ . Значення інших коефіцієнтів  $m^+ = 0,9$ ,  $m^- = 0,1$ ,  $\lambda = 0,5$ . Для навчання та розпізнавання CapsNet пропонується використовувати алгоритми, докладно описані в джерелах [7; 11].

Особливістю навчання CapsNet є застосування алгоритму динамічної маршрутизації між капсулами для розрахунку коефіцієнтів  $c_{ij}$ . Псевдокод процедури маршрутизації має такий вигляд:

**procedure** Routing( $\hat{u}_{j|i}$ ;  $r$ );

for all capsule  $i$  in layer  $l$  and capsule  $j$  in layer  $(l + 1)$ :  $b_{ij} \leftarrow 0$

for  $r$  iterations do

for all capsule  $i$  in layer  $l$ :  $c_i \leftarrow \text{softmax}(b_i)$

for all capsule  $j$  in layer  $(l + 1)$ :  $s_j \leftarrow \sum_i c_{ij} \hat{u}_{j|i}$

for all capsule  $j$  in layer  $(l + 1)$ :  $v_j \leftarrow \text{squash}(s_j)$ .

for all capsule  $i$  in layer  $l$  and capsule  $j$  in layer  $(l + 1)$ :  $b_{ij} \leftarrow b_{ij} + \hat{u}_{j|i} \cdot v_j$

**return**  $v_j$

Для формування навчальної та тестової вибірки використані бази даних Fer2013-images, emotion\_analysis, modified\_fer2014, FER2018, доступні на сайті [www.kaggle.com](http://www.kaggle.com). Сформовані з використанням вказаних баз даних навчальні приклади

є jpg-файлами з фотографіями обличч людей, що виражають сім базових емоцій та нейтральний стан.

Приблизно на половині навчальних прикладів фотографії обличчя зафіксовано у фронтальній проекції, на іншій половині – в повернутому стані. Кут повороту становить від  $-45^\circ$  до  $+45^\circ$ . Кожна фотографія є зображенням  $48 \times 48$  пікселів у відтінках сірого. Обсяг навчальної та тестової вибірки становить 40 000 та 40 00 прикладів відповідно. Приклади зображень наведено на рис. 2.

На першому етапі досліджень проведено експерименти з розпізнавання емоцій на основі фронтального, добре освітленого зображення обличчя. Другий етап досліджень пов'язаний з розпізнаванням емоцій на зображеннях повернутого обличчя. Експерименти реалізовані за допомогою розробленої комп'ютерної програми, яка базувалась на математичному апараті, заданому виразами (1–10). Отримані значення середньої похибки розпізнавання базових емоцій наведено в табл. 1.

Для порівняння в табл. 1 також наведено дані [1; 2] щодо похибки розпізнавання за допомогою класичної ЗНМ LaNet, що є однією з найбільш сучасних модифікацій ЗНМ VGG, двошарового перцептронну (MLP) та ймовірнісного класифікатора на базі НМ типу PNN.

Дані табл. 1 свідчать про те, що похибка розпізнавання фронтальних зображень CapsNet нижче похибки LaNet, MLP та PNN та вище похибки VGG. При цьому похибка розпізнавання емоцій на повернутих зображеннях за допомогою CapsNet порівнянна з похибкою сучасних типів ЗНМ та

значно менше похибки LaNet, MLP та PNN. Також можна стверджувати, що точність розпізнавання CapsNet повернутих зображень приблизно на 5% нижче, ніж фронтальних. В разі використання LaNet і VGG точність погіршується приблизно на 9%. Крім цього, експерименти показали, що час навчання CapsNet значно перевищує час навчання інших НМ. Водночас ресурсоемність CapsNet набагато нижче ресурсоемності мережі VGG.

**Висновки.** В результаті проведених досліджень розроблена нейромережева модель типу CapsNet, призначена для розпізнавання базових емоцій з урахуванням повороту обличчя, яка є характерною задачею розпізнавання для інформаційних систем загального призначення. Експериментальним шляхом показано, що під час розпізнавання емоцій на фронтальних зображеннях похибка CapsNet значно менше, ніж похибка класичних нейромережевих моделей типу LaNet, MLP та PNN. Однак LaNet MLP та PNN перевершують CapsNet щодо кількості навчальних ітерацій, необхідних для досягнення прийнятної помилки навчання. Похибка розпізнавання CapsNet фронтальних зображень дещо більше за похибку сучасних типів згорткових нейронних мереж, що мають порівняно з нею значно вищу ресурсоемність. Під час розпізнавання емоцій на повернутих зображеннях обличчя похибка CapsNet незначно відрізняється від похибки сучасних типів згорткових мереж, а також є значно меншою, ніж похибка класичних нейронних мереж. Перспективи подальших досліджень

Таблиця 1

Середня похибка розпізнавання базових емоцій

Ракурс зображення обличчя	Тип нейромережевої моделі				
	CapsNet	LaNet	VGG	MLP	PNN
Фронтальний	14,7	21,7	7,3	25,5	23,7
Повернутий	18,8	28,6	12,6	32,9	34,1



Рис. 2. Приклади фотографій навчальної вибірки

щодо нейромережевого розпізнавання емоцій по геометрії обличчя можуть бути пов'язані з удосконаленням архітектурних рішень капсульної нейронної мережі стосовно зменшення кількості навчальних ітерацій під час забезпечення при-

йнятної похибки розпізнавання. Крім цього, підвищення ефективності системи нейромережевого розпізнавання емоцій пов'язане із забезпеченням класифікації розмитого й частково прихованого зображення обличчя.

#### Список літератури:

1. Бобе А.С., Коньшев Д.В., Воротников С.А. Система распознавания базовых эмоций на основе анализа двигательных единиц лица. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2016. Вып. 9. С. 1–16.
2. Anderson K., McOwan P. A real time automated system for the recognition of human facial expressions. *Systems, man, and cybernetics. IEEE Transactions*. 2006. Vol. 36. P. 96–105.
3. Batista J.C., Albiero V., Bellon O.R., Silva L. Aumpnet: simultaneous action unit's detection and intensity estimation on multipose facial images using a single convolutional neural network. *In Automatic Face & Gesture Recognition. 12th IEEE International Conference*. 2017. P. 866–871.
4. Chandrani S., Washef A., Soma M., Debasis M. Facial expressions: a cross-cultural study. *Emotion recognition: a pattern analysis approach. Wiley Publ.* 2015. P. 69–86.
5. Ertugrul O., Jeni L.A., Cohn J.F. Facscaps: pose-independent facial action coding with capsules. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (Salt Lake City)*. 2018. P. 221101–221109.
6. Ghosh S., Laksana E., Scherer S., Morency L.-P. A multi-label convolutional neural network approach to cross domain action unit detection. *Affective computing and intelligent interaction: international conference*. 2015. P. 609–615.
7. Hinton G., Sabour S., Frosst N. Matrix capsules with EM routing. *ICLR Conference. Vancouver Convention Center (Vancouver, BC, Canada)*. 2018.
8. Multi view facial action unit detection based on CNN and BLSTM-RNN / J. He, D. Li, B. Yang, S. Cao, B. Sun, L. Yu. *Automatic Face & Gesture Recognition. 12th IEEE International Conference*. 2017. P. 848–853.
9. Ilbeygi, M., Shah-Hosseini, H. A novel fuzzy facial expression recognition system based on facial feature extraction from color face images. *Engineering applications of artificial intelligence*. 2012. P. 130–146.
10. Sabour S., Frosst N., Hinton G. Dynamic Routing Between Capsules. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. P. 3857–3867.
11. Emotion recognition from an ensemble of features / U. Tariq, K. Lin, Z. Li, Z. Zhou, Z. Wang, V. Le, T.S. Huang, X. Lv, T.X. Han. *Systems, man, and cybernetics. IEEE Transactions*. 2012. Vol. 42. P. 17–26.

#### НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМОЦИЙ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ЛИЦА

Статья посвящена разработке нейросетевой модели, позволяющей реализовать распознавание эмоций на основе изображения лица человека при воздействии помех, характерных для информационных систем общего назначения. Определена низкая приспособленность распространенных решений на базе сверточных нейронных сетей к нивелированию такой характерной помехи, как поворот лица на анализируемом изображении. Предложено исправить указанный недостаток за счет применения капсульной нейронной сети, являющейся развитием сверточных нейронных сетей касательно распознавания зашумленных изображений. Разработана соответствующая нейросетевая модель, эффективность которой доказана экспериментально. Показано, что перспективы дальнейших исследований в области нейросетевого распознавания эмоций по геометрии лица могут быть связаны с совершенствованием архитектурных решений капсульной нейронной сети с целью уменьшения количества учебных итераций при обеспечении приемлемой погрешности распознавания.

**Ключевые слова:** эмоциональное состояние, базовые эмоции, изображение лица, нейросетевая модель, капсульная нейронная сеть.

#### NEURAL NETWORK MODEL OF EMOTIONAL RECOGNITION BY IMAGE OF FACE

The article is devoted to solving the problem of developing a neural network model, which allows realizing the recognition of emotions on the basis of image of a person's face under the influence of interferences, characteristic for information systems of general purpose. The low adaptability of distributed solutions based on the packet neural networks to the leveling of such a characteristic barrier as facial rotation in the image to be analyzed is determined. It is proposed to correct this shortcoming due to the use of the capsule neural network, which is the development of convolutional neural networks in the direction of recognition of noisy images. A corresponding neural network model has been developed, the efficiency of which has been proved experimentally. It is shown that the prospects for further research in the field of neural network recognition of emotions in face geometry can be related to the improvement of architectural solutions of the capsular neural network in the direction of reducing the number of training iterations while providing an acceptable recognition error.

**Key words:** emotional state, basic emotions, face image, neural network model, capsule neural network.

УДК 0048:681.3

**Тимофєєва А.Є.**

Запорізький національний університет

**Кудін О.В.**

Запорізький національний університет

**Кривохата А.Г.**

Запорізький національний університет

**Лісняк А.О.**

Запорізький національний університет

## АВТОМАТИЧНЕ АНОТУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

*У цій роботі розглянуто основні методи та моделі машинного навчання, які застосовуються для розв'язання задачі автоматичного анотування зображень. Нині системи, які мають здатність вилучати значення з візуальних даних, дедалі більше розвиваються та використовуються як у наукових колах, так і в промисловості. Одним із важливих напрямів у рамках цієї задачі є розробка автоматичних систем для розуміння візуальних сцен. Розроблено систему автоматичного анотування зображень із використанням загорткової нейронної мережі. На етапі попередньої обробки зображення застосовується кілька підходів до вилучення візуальних ознак. Окреслено напрям подальшого розвитку систем анотації зображень.*

**Ключові слова:** автоматична анотація зображень, згорткова нейронна мережа, машинне навчання, візуальні ознаки, класифікація.

**Постановка проблеми.** Автоматичне анотування зображень є досить перспективною областю досліджень, оскільки такі системи можуть використовуватись для пошуку зображень та як підсистеми в системах штучного інтелекту. У методах анотування зображень ключову роль відіграють візуальні ознаки, які вилучаються із зображень і використовуються для їх компактного представлення. У загальному випадку використовувані ознаки можна поділити на ознаки кольору, текстури та форми, своєю чергою, розрізняють регіональні (засновані на локальних характеристиках окремих регіонів зображень) і глобальні (обчислювані для всього зображення загалом) представлення зображень. У розглянутих нижче статтях автори використовують низку класифікаторів, які на основі отриманих візуальних ознак формують відповідь у вигляді ключових слів або міток, що описують зображення. У деяких роботах пропонується підхід, за якого можна отримувати зв'язний текст, що описує зображення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує кілька підходів до класифікації методів автоматичного анотування зображень, наприклад, ймовірнісні та детерміновані методи, методи, засновані

на навчанні, та пошукові методи, контрольовані (з учителем), напівконтрольовані та неконтрольовані методи. Проте більшість літературних джерел [1–3] виділяють п'ять категорій: 1) породжувальні методи (англ. Generative model-based approach), які генерують спільний ймовірнісний розподіл ознак зображення та міток; 2) методи найближчих сусідів (англ. Nearest neighbor model-based approach), які припускають, що зображення з такими ознаками мають велику ймовірність розділяти схожі мітки; 3) розрізнювальні (умовні) методи (англ. Discriminative model-based approach), які розглядають завдання анотації як проблему прогнозування класу зображення залежно від ознак; 4) методи, засновані на завершенні міток (англ. Tag completion model-based approach), які можуть не тільки передбачити, але й виправити мітки, які введено помилково; 5) методи глибинного навчання (англ. Deep learning-based approach), які можуть використовувати для прогнозування як необроблені зображення, так і вилучені задалегідь ознаки.

Далі наведено класичні методи машинного навчання, які за загальноприйнятою класифікацією можна зарахувати до породжувальних методів, умовних та методів найближчих сусідів.

Поширеним є використання SVM (англ. Support Vector Machine) в об'єднанні з алгоритмом KNN (англ. k-Nearest Neighbor) [4; 5]. Мета використання SVM у розв'язанні задачі анування полягає в тому, щоб створити модель, яка передбачає тільки цільове значення екземплярів даних з атрибутами в тестовому наборі [6]. В роботах [7; 8] було використано двопрхідний метод k-найближчих сусідів (англ. 2-Pass K-Nearest Neighbor), в якому у процесі анування нового зображення на першому проході методу з кожної семантичної групи вибирається по два найбільш схожих навчальних зображення, які потім об'єднуються в набір зображень. Отриманий набір включає найбільш інформативні навчаючі зображення для прогнозування приналежності ключових слів новому зображенню. На другому проході методу здійснюється оцінка ймовірностей за допомогою зображень тренувального набору даних.

У роботах науковців [9–11] було запропоновано метод CMRM (англ. Cross-Media Relevance Model), в якому зображення сегментуються на області, після чого з областей, розмір яких більше певного порогу, вилучаються вектори ознак. Всі отримані вектори групуються в кластери візуально схожих областей зображень (візуальні слова), а кожне зображення з навчальної вибірки представляється у вигляді набору візуальних і ключових слів. Також у статті «Multiple Bernoulli relevance models for image and video annotation» [12] було показано, що поділ зображення на прямокутні плитки замість використання методів автоматичної сегментації призводить до підвищення точності і повноти анування. Ця модифікація отримала назву Multiple Bernoulli Relevance Model (MBRM) [13; 14].

Гібридну модель SVM-DMBRM розроблено у роботі «A Hybrid Model for Automatic Image Annotation» [15]. Автори поєднують метод опорних векторів, що виступає в ролі розрізняючої моделі та дискретний метод MBRM – як породжувальна модель. Ймовірності присвоєння ключових слів зображенню, отримані окремо для класифікаційної і генеративної частин методу, лінійно комбінуються, формуючи ранжований список ключових слів.

У роботі «Supervised LDA for Image Annotation» [16] використовуються методи Latent Semantic Analysis (PLSA) та Latent Dirichlet Allocation (LDA), які зазвичай використовуються в задачах обробки текстових даних.

Автори статті «Automatic image annotation using community detection in neighbor images.» [17] пропонують метод виявлення спільних ознак у сусідніх зображеннях. На першому етапі запропонованого способу сусідні зображення, які схожі із зображен-

ням з запиту, вилучаються за допомогою функцій низького рівня. На другому етапі створюється мережа міток сусідніх зображень, з яких обираються ті, що найбільш релевантні для зображення із запиту.

У роботі «A New Baseline for Image Annotation» [18] було запропоновано використовувати метод Joint Equal Contribution (JEC), який полягає в тому, що зображення описується за допомогою 7 глобальних ознак, які обчислено на основі кольору та текстури зображення, нормалізованих таким чином, щоб значення відстаней між парами ознак будь-яких двох зображень знаходилися в діапазоні [0; 1]. При порівнянні двох зображень спочатку окремо обчислюються відстані для кожного типу ознак, після чого отримані значення об'єднуються з рівними вагами. У процесі анування нового зображення для нього визначається 5 найближчих навчальних зображень, відсортованих за збільшенням відстані.

Використовують графові моделі, які дають змогу дослідити взаємозв'язки між мітками та використовуваними ознаками [19; 20].

Інша група методів належить до категорії глибинного навчання. Так, наприклад, у роботах деяких науковців [21–23] використано згорткові нейронні мережі. Згорткові нейронні мережі (англ. Convolutional neural network, CNN) використовуються для вилучення візуальних ознак зображення, починаючи з таких базових функцій, як контури зображень, а потім поступово створюють більш складні ознаки, які можуть описувати форму та колір. Також згорткові нейронні мережі поєднують з рекурентними нейронними мережами (англ. Recurrent neural network, RNN). Так, у роботах «Automatic Image Annotation Model Using LSTM Approach, Signal & Image Processing», «An Adaptive Recognition Model for Image Annotation» [25; 26] як RNN використана модель LSTM (англ. Long short-term memory), яка відповідає за формування розширеної текстової анотації до зображення. У статті «An Adaptive Recognition Model for Image Annotation» [26] використано адаптивну модель розпізнання (англ. Adaptive recognition model, ARM). ARM складається з адаптивної класифікаційної мережі і нелінійної кореляційної мережі. Для поліпшення точності семантичного анування зображень у роботах «A semantic approach for automatic image annotation», «Image Annotation by Moments» [27; 28] було застосовано систему, яка поєднує три класифікатора і комбінації деяких методів вилучення ознак зображень: мультикласовий метод опорних векторів, багатошарова нейронна мережа та класифікатори найближчих сусідів об'єднуються разом для класифікації та надання відповідних ключових слів для цього вмісту.

Анотування зображень може також розглядатися як підмодуль системи пошуку зображень. Так, пошук зображення може бути реалізовано за допомогою отримання візуальної інформації (англ. Content-based visual information retrieval, CBVIR) або за допомогою тексту (англ. Text-based visual information retrieval, TBIR). CBIR аналізує візуальний вміст (колір, текстуру, форму тощо) зображень без врахування метаданих зображення (мітки, оточуючі тексти тощо) для його пошуку, а TBIR, навпаки, використовує метадані зображення для пошуку [29].

З аналізу літературних джерел можна дійти висновку, що наявні методи розв’язання задачі автоматичного анотування зображень дають змогу отримувати задовільні результати класифікації при цьому шляхом великої кількості використовуваних методів, є можливість гнучкого налаштування системи анотування. Вилучення ознак зображення – це один із необхідних компонентів системи анотування зображень, адже представлення зображення у вигляді вектору ознак дає змогу збільшити якість класифікації та зменшити час навчання системи.

У літературних джерелах, які наведено в огляді, майже не розглядається задача автоматичного налаштування параметрів алгоритмів машинного навчання, наприклад, за допомогою генетичних методів. Такі гібридні системи можуть стати предметом досліджень у подальших публікаціях.

**Постановка завдання.** Метою роботи є побудова системи автоматичного анотування зображень різного змісту на основі згорткових нейронних мереж та проведення обчислювальних експериментів із

метою зменшення кількості шарів при задовільній якості анотування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Особливість задачі автоматичного анотування зображень, порівняно зі звичайною класифікацією, полягає в тому, що одне зображення може належати до кількох класів (англ. Multi-Label Classification, MLC). Це треба враховувати під час налаштування будь-якого класифікатора, тобто функція втрат та метрики оцінки якості моделі мають бути налаштовані саме для задачі MLC.

Однією з найбільш застосовуваних архітектур штучних нейронних мереж для задач класифікації зображень є згорткові нейронні мережі. Передбачається використання кількох типів шарів, які чергуються один з одним, утворюючи складну структуру. В шарах згортки виконується афінне перетворення вхідних даних на вихідну мапу ознак. Шари субдискретизації виконують зменшення розмірності мапи ознак, застосовуючи віконну функцію та обираючи максимальне (або середнє) значення серед тих, що потрапили у вікно. У повнозв’язних шарах, на вхід яких поступає набір досить абстрактних ознак, виконується безпосередньо класифікація. Сучасні архітектури згорткових нейронних мереж можуть використовувати десятки шарів, наприклад, мережа VGG-16 (англ. Visual Geometry Group) використовує 16 шарів [30].

Для тренування та тестування нейронної мережі в цій роботі використовується анотований набір даних IAPR-TC12, який складається з 20 000 зображень, із кожним зображенням пов’язаний ієрархічний набір ознак, наприклад, entity->humans->person->child. Докладно набір даних описано в роботі «The segmented and annotated IAPR TC-12 benchmark» [31].

На практиці задовільну якість класифікації засобами згорткових нейронних мереж можна досягнути при невеликій кількості шарів. Зокрема, це досягається шляхом використання попередньої обробки зображень, під час якої обчислюються певні ознаки, наприклад, форми, кольорів тощо. Для зменшення розмірності задачі та пришвидшення обчислень у цій роботі використовуються шість можливих міток для кожного зображення: люди, природа, штучні вироби, тварини, їжа.

Розв’язання задачі автоматичного анотування зображень виконується в кілька етапів (рис. 1а), основне призначення яких – підготовка даних та подальше навчання класифікатора.

У цій роботі пропонується така конфігурація згорткової нейронної мережі: один набір шарів згортки, активації, субдискретизації та два повнозв’язних шари (рис. 1б).

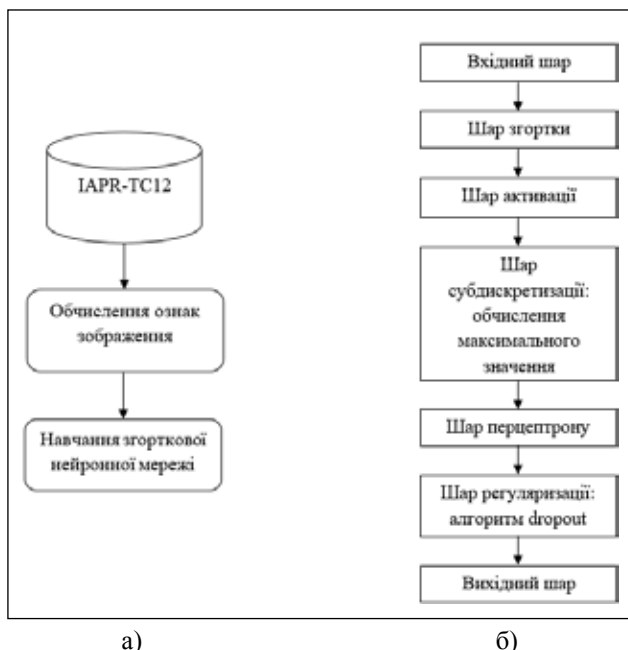


Рис. 1. Етапи розв’язання задачі та структура нейронної мережі



Важливим етапом при навчанні нейронних мереж є визначення багатьох параметрів, які керують процесом навчання, так званих гіперпараметрів мережі. До них належать: спосіб початкової ініціалізації ваг мережі, функції активації та кількості епох навчання. Параметри нейронної мережі та деталі реалізації засобами Python бібліотеки Keras наведено на рисунку 2. Як функція активації використовувалась функція Relu, а на останньому повнозв'язному шарі – функція Sigmoid.

Точність побудованої моделі та функція похибки залежно від епох навчання наведені на рисунку 3. Наводяться значення для навчальної та тестової вибірки.

**Висновки.** У роботі побудовано систему автоматичного анування зображень на основі

згорткової нейронної мережі, яка дає змогу поставити у відповідність кожному зображенню кілька текстових міток. У результаті обчислювальних експериментів виявлено, що точність моделі на тестових даних становить приблизно 90%. Варто зазначити, що для розв'язку поставленої задачі достатньою виявилася структура нейронної мережі із одним пакетом шарів згортки-активації-субдискретизації. Перспективи подальших досліджень пов'язані із застосуванням відомих у літературі підходів до побудови ансамблів нейронних мереж та автоматичним налаштуванням гіперпараметрів такої системи методами генетичного програмування.

```
def CreateModel(self):
    batch_size = 10
    data_rows = self.fft_n
    data_cols = self.fft_m
    input_shape = (data_rows, data_cols, 1)
    ##### Визначення шарів згортки та субдискретизації
    self.model = models.Sequential()
    self.model.add(Conv2D(64, (3, 3), input_shape=input_shape, border_mode="same",
        data_format="channels_last", kernel_initializer=self.kernel_initializer,
        bias_initializer=self.bias_initializer, kernel_regularizer=self.kernel_regularizer))
    self.model.add(Activation(self.activation))
    self.model.add(MaxPooling2D(pool_size=(3,3)))
    ##### Визначення шару перцептрон
    self.model.add(Flatten())
    self.model.add(Dense(128, kernel_initializer=self.kernel_initializer, bias_initializer=self.bias_initializer))
    self.model.add(Activation(self.activation))
    self.model.add(Dropout(0.8))
    self.model.add(Dense(6, kernel_initializer=self.kernel_initializer, bias_initializer=self.bias_initializer))
    self.model.add(Activation('sigmoid'))
    ##### Компіляція моделі
    nb_epoch = 100 # Кількість епох навчання
    alpha_zero = 0.0001 # Коефіцієнт швидкості навчання
    optimizer = optimizers.SGD(lr=alpha_zero, momentum=0.0, decay=0.0, nesterov=False)
    self.model.compile(loss = "binary_crossentropy", optimizer=optimizer, metrics = ["binary_accuracy"])
    self.history = self.model.fit(self.xTrain, self.yTrain, batch_size = batch_size,
        epochs = nb_epoch, verbose=2, validation_data = (self.xTest, self.yTest))
```

Рис. 2. Програмна реалізація згорткової нейронної мережі

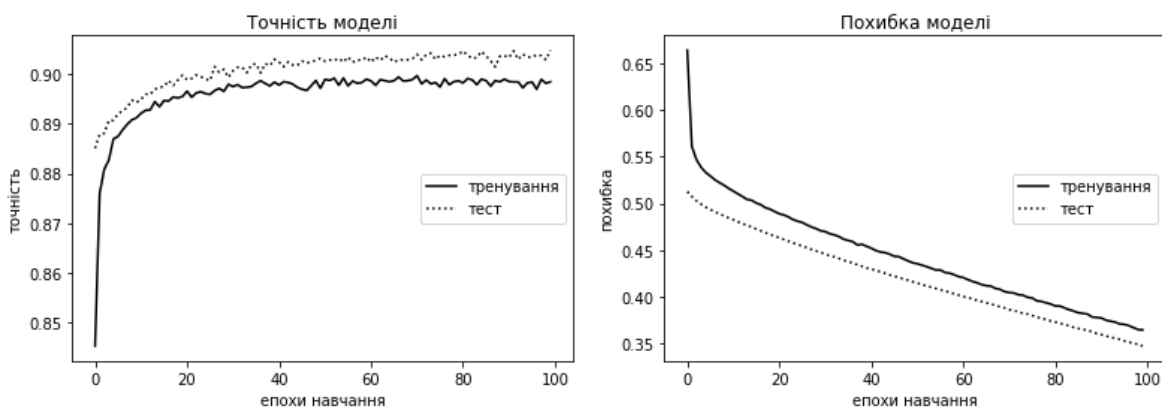


Рис. 3. Точність та похибка розробленої моделі

**Список літератури:**

1. Qimin Cheng, Qian Zhang, Peng Fu, Conghuan Tu, Sen Li. A survey and analysis on automatic image annotation. *Pattern Recognition* 79. 2018. P. 242–259.
2. Jiwei Hu, Kin-Man Lam, Ping Lou and Quan Liu. Constructing a hierarchical tree for image annotation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo*. 2017. DOI: 10.1109/ICME.2017.8019512.
3. Bhagata P., Prakash Choudharya. Image Annotation: Then and Now. *Image and Vision Computing*. 2018. doi:10.1016/j.imavis.2018.09.017.
4. Guanglei Chu, Kai Niu, Baoyu Tian. Automatic image annotation combining SVM and KNN algorithm. 3rd International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems. 2014. P. 27–29. DOI: 10.1109/CCIS.2014.71756952014.
5. Cong Jin, Qing-Mei Sun, Shu-Wei Jin. A hybrid automatic image annotation approach. *Multimedia Tools and Applications*. 2018. P. 1–20. URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6742-6>.
6. Claudio Cusano, Gianluigi Ciocca. Image annotation using SVM. *University of Milano Bicocca Via Bassini*. 2013. P. 15.
7. Verma Y., Jawahar C.V. Image Annotation Using Metric Learning in Semantic Neighbourhoods. *Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision*. 2012. Vol. 7574. P. 836–849.
8. Artin Ghostan Khatchatoorian, Mansour Jamzad. An Image Annotation Rectifying Method Based on Deep Features. *Proceeding ICDSIP 2018 Proceedings of the 2nd International Conference on Digital Signal Processing*. P. 88–92.
9. Jeon J., Lavrenko V., Manmatha R. Automatic image annotation and retrieval using cross-media relevance models. *Proceedings of the 26th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*. 2003. Pp. 119–126.
10. Julian Sahertian, Saiful Akbar. Automatic Image Annotation Using CMRM with Scene Information. *Telkomnika*. 2017. Vol. 15, No. 2. Pp. 693–701. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.v15i2.5160.
11. Jeon J., Lavrenko V., Manmatha R. Automatic Image Annotation and Retrieval using Cross-Media Relevance Models, 2003.
12. Feng S.L., Manmatha R., Lavrenko V. Multiple Bernoulli relevance models for image and video annotation. *In Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*. 2004. Vol. 2. Pp. 1002–1009.
13. Ameesh Makadia, Vladimir Pavlovic, Sanjiv Kumar. Baselines for Image Annotation. *Article in International Journal of Computer Vision*, 2010. DOI: 10.1007/s11263-010-0338-6.
14. Feng S.L., Manmatha R. and Lavrenko V. Multiple Bernoulli Relevance Models for Image and Video Annotation. *Multimedia Indexing and Retrieval Group Center for Intelligent Information Retrieval University of Massachusetts*.
15. Venkatesh N. Murthy, Ethem F. Can. A Hybrid Model for Automatic Image Annotation. *Conference Paper*. 2014. DOI: 10.1145/2578726.2578774.
16. Guo Qiaojin, Li Ning, Yang Yubin and Wu Gangshan. Supervised LDA for Image Annotation. *National Key Laboratory for Novel Software Technology Nanjing University Nanjing*.
17. Vafa Maihama, Farzin Yaghmaee. Automatic image annotation using community detection in neighbor images. *Physica A* 507. 2018. P. 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.05.028>.
18. Makadia A., Pavlovic V., Kumar S. A New Baseline for Image Annotation. *Proceedings of the 10th European Conference on Computer Vision*. 2008. Vol. 5304. Pp. 316–329.
19. Jiwei Hu, Kin-Man Lam, Ping Lou, Quan Liu. Constructing a hierarchical tree for image annotation. *The Hong Kong Polytechnic University*. 2017.
20. Shaohua Wan. Image Annotation Using the Simple Decision Tree. *International Conference on Management of e-Commerce and e-Government School of Information and Safety Engineering*. 2011.
21. Utkarsh Ojha, Utsav Adhikari, Dushyant Kumar Singh. Image Annotation Using Deep Learning. *International Conference on Intelligent Computing and Control*. 2017.
22. Ayushi Dutta, Yashaswi Verma-C. V. Jawahar. Automatic image annotation: the quirks and what works. URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6247-3>.
23. Yanchun Ma Yongjian, Liu Qing, Xie Lin Li. CNN-feature based automatic image annotation method. URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6038-x>.
24. Fangxiang Feng, Ruishan Liu, Xiaole Wang, Hueming Li, Song Bi. Personalized Image Annotation Using Deep Architecture. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2764510
25. Sonu Pratap, Singh Gurjar, Shivam Gupta. Automatic Image Annotation Model Using LSTM Approach, Signal & Image Processing. *An International Journal*. 2017. Vol. 8. No. 4. DOI: 10.5121/sipij.2017.8403.
26. An Adaptive Recognition Model for Image Annotation. *Article in IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part*. 2012. DOI: 10.1109/TSMCC.2011.2178831.

27. Mustapha Oujaoura, Brahim Minaoui. M L. A semantic approach for automatic image annotation. *8th International Conference on Intelligent Systems*. 2013. DOI: 10.1109/SITA.2013.6560800.
28. Mustapha Oujaoura, Brahim Minaoui and Mohammed Fakir. Image Annotation by Moments. DOI: 10.15579/gcr.vol11.
29. Karthik Senthil, Abhi Arun and Kamath S. Sowmya. A Content-Based Visual Information Retrieval Approach for Automated Image Annotation. *Chapter in Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. DOI: 10.1007/978-981-10-3373-5\_6.
30. Geron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow. Sebastopol : O'Reilly. 2017.
31. Hugo Jair Escalante, Carlos A. Hernandez, Jesus A. Gonzalez, Aurelio Lopez, Manuel Montes, Eduardo F. Morales, L. Enrique Sucar, Luis Villaseñor, and Michael Grubinger. The segmented and annotated IAPR TC-12 benchmark. *Computer Vision and Image Understanding*, 114(4):419– 428. 2010.

### **АВТОМАТИЧЕСКОЕ АННОТИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ СРЕДСТВАМИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

*В данной работе рассмотрены основные методы и модели машинного обучения, которые применяются для решения задачи автоматического аннотирования изображений. Системы, которые могут извлекать значения из визуальных данных, все больше развиваются и используются как в научных кругах, так и в производстве. Одним из важнейших направлений в рамках этой задачи является разработка автоматических систем для понимания зрительных сцен. Разработана система аннотирования изображений с использованием сверточной нейронной сети. На этапе предобработки изображения извлекаются визуальные признаки. Предложены направления дальнейшего развития систем аннотаций изображений на основе теоретических и экспериментальных моделей.*

**Ключевые слова:** автоматическое аннотирование изображений, сверточная нейронная сеть, машинное обучение, визуальные признаки, классификация.

### **AUTOMATIC IMAGE ANNOTATION USING NEURAL NETWORKS**

*This paper discusses the models and methods of machine learning that are employed to solve the problem of automatic image annotation and classification of these methods. Today, the systems which have the ability to extract meaning from visual data are increasingly developed and used both in academia and industry. One of the practically important directions within the scope of this problems is the development of automatic systems for understanding of visual scenes. In this paper, we develop a proof-of-concept system for the image annotation using convolutional neural network. In the image processing stage, we extract visual features. In addition, we outline a direction for further development of image annotating systems based on both theoretical and experimental models.*

**Key words:** Automatic Image Annotation, Convolutional Neural Networks, machine learning, Visual Features, classification.

УДК 658.512

**Трифонов А.І.**

Національний аерокосмічний університет  
імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

**Доценко Н.В.**

Національний аерокосмічний університет  
імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВЗАЄМОДІЇ СТЕЙКХОЛДЕРІВ ІННОВАЦІЙНОГО ПРОЕКТУ

*У статті розглянуто особливості інноваційного проекту, запропоновано модель класифікації залучених стейкхолдерів та модель взаємодії зацікавлених сторін інноваційного проекту. Під час розробки моделі було розглянуто наявність внутрішніх та зовнішніх стейкхолдерів. Також враховано різні типи зв'язків – прямі та непрямі. Детально розглянуто внесок та стимул для кожної з груп зовнішніх та внутрішніх стейкхолдерів. Модель дає змогу комплексно оцінити взаємодію між зацікавленими сторонами, враховуючи їх індивідуальні особливості.*

**Ключові слова:** стейкхолдер, зацікавлена сторона, взаємодія, зовнішні стейкхолдери, внутрішні стейкхолдери, прямі зв'язки, непрямі зв'язки, стимул, внесок.

**Постановка проблеми.** Важливою рушійною силою економіки розвинених країн є інноваційні проекти, які не тільки рекомендуються, але й необхідні для забезпечення виживання та зростання підприємств, особливо в сфері машинобудування. З огляду на стрімку глобалізацію та інтенсивний розвиток інформаційних і комунікаційних технологій, дедалі більше зацікавлених сторін беруть участь в інноваційних процесах. Інноваційна діяльність являє собою комплекс наукових, технологічних, виробничих, організаційних, фінансових та комерційних заходів, сукупність яких приводить до впровадження нових або удосконалення існуючих продуктів.

Емпіричні дані та наявні дослідження показують, що взаємодія між зацікавленими сторонами є важливим елементом інноваційних процесів. Отже, при управлінні і вивченні інновацій необхідно враховувати взаємодію між зацікавленими сторонами, яка відіграє важливу роль у всіх типах інноваційних процесів, а не тільки в інноваціях бізнес-моделей.

Незважаючи на велику кількість робіт, пов'язаних із дослідженням відносин між зацікавленими сторонами, питання ефективного аналізу взаємозв'язків між стейкхолдерами інноваційного проекту досі актуальне.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Стейкхолдер (зацікавлена сторона) – фізична особа або організація, що має права, частку, вимоги або інтереси щодо системи або її властивостей, що задовольняють їх потребам та очікуванням [1]. Стейкхолдери забезпечують можливості для системи (внесок) і є джерелом вимог для системи (стимул).

Внесок – це матеріальні ресурси або послуги, внесені зацікавленими сторонами в проект із метою участі та отримання прибутку.

Стимули – це блага, які можуть задовольнити потреби людини при виконанні ним певних дій [2].

Зацікавлена сторона може впливати або ж бути під впливом діяльності або результату проекту. Зацікавлені сторони або безпосередньо залучені в проект, або мають інтереси, на які може вплинути результат проекту.

Проведене дослідження показало, що низка наукових праць присвячена дослідженню взаємодій між стейкхолдерами. Так, у роботі М.С. Рахманової «Разработка методов инновационного стратегического анализа вуза на основе теории заинтересованных сторон» [3] запропонована методика розрахунку ефективності взаємодії між вузом і його групами зацікавлених сторін. Запропоновано методичний підхід до оцінки конкурентного потенціалу вузу як стейкхолдер-компанії.

У роботі «Карта заинтересованных сторон – инструмент анализа окружения бизнеса» [4] автори пропонують кількісну інтегральну міру оцінки оточення бізнесу, засновану на карті зацікавлених сторін.

Є велика кількість підходів до класифікації зацікавлених сторін [5–9]: первинні і вторинні; прямі і непрямі; загальні та спеціалізовані; стратегічні та етичні; нормативні, непрямі і небезпечні (пасивні) зацікавлені сторони.

А. Менделову аналізує зацікавлені сторони залежно від їх інтересів та їх влади, відповідно, здат-

ності впливати на діяльність підприємства та бажанням робити це [10]. Інтегрований показник – вплив зацікавленої сторони, який визначається шляхом множення влади та інтересу.

Розширенням моделі А. Менделоу можна назвати типологію Р. Мітчелла [11]. В основі типології – три фактори: законність, значимість та терміновість, тобто юридична легітимність віддавати вказівки, сила впливу зацікавленої сторони на підприємство, мінімально необхідна швидкість відповідей на запити зацікавленої сторони.

У роботі «Gower Handbook of Project Management» [12] представлено алгоритм впливу стейкхолдерів на різних ділянках життя проекту та запропоновано використання науково-економічного підходу до моделі оцінки взаємодії зі стейкхолдерами.

**Постановка завдання.** Залучення стейкхолдерів в інноваційний цикл сприяє своєчасному забезпеченню ресурсами і росту інноваційної та ділової активності. Залучення зовнішніх та внутрішніх стейкхолдерів у бізнес або окремих внутрішньогалузевий, або міжгалузевий проект буде сприяти збільшенню матеріальних ресурсів, створення сприятливих умов для ведення бізнесу, оперативності прийняття та реалізації рішень. Тому в процесі проектного управління галузевим або міжгалузевим інноваційним перетворенням чи розвитком необхідно враховувати думки та інтереси всіх зацікавлених сторін.

**Метою статті** є розробка моделі взаємозв'язків стейкхолдерів інноваційного проекту з урахуванням наявності внутрішніх і зовнішніх зацікавлених сторін та прямих і непрямих зв'язків між ними.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У процесі аналізу особливостей інноваційних проектів стало зрозуміло, що на проект прямо та опосередковано впливає багато факторів. У кожному проекті, незалежно від його масштабу, структури, цілей є зацікавлені сторони, які поділяються на дві категорії: внутрішні і зовнішні. Внутрішні стейкхолдери включають в себе окремі особи або організації, які знаходяться всередині проекту. Зовнішні зацікавлені сторони зовні впливають на хід проекту або, навпаки, можуть знаходитися під його впливом.

Якщо проект невеликий за розміром, число зацікавлених сторін може бути невеликим. Однак, якщо проект великий, у нього може бути дуже велика кількість зацікавлених сторін, включаючи спільноти або широку громадськість. Крім того, необхідно враховувати, що всі зацікавлені сторони не однакові, тому що у кожного стейкхолдера різні очікування і потреби. Кожна зацікавлена сторона потребує індивідуального підходу відповідно до її потреб, інакше

стейкхолдеру може бути приділено мало уваги або інформації, що може поставити проект під загрозу.

Різні зацікавлені сторони часто мають протилежні очікування, які можуть призвести до суперечок у рамках проекту. Необхідно розуміти, що стейкхолдери можуть також втручатися в проект, його результати і проектну команду задля виконання своїх стратегічних бізнес-завдань або інших вимог.

Зацікавлені сторони мають різні рівні обов'язків і повноважень за участю в проекті. Рівень впливу або участі стейкхолдера може відрізнятися на різних етапах перебігу проекту. Це може варіюватися від випадкових внесків до повного спонсорства проекту.

Ідентифікація зацікавлених сторін – це безперервний процес протягом усього життєвого циклу проекту. Аналіз рівня їх впливу на проект і задоволення їх вимог, потреб та очікувань має дуже велике значення для успіху проекту загалом.

Складні взаємозв'язки в інноваційних проектах часто приводять до таких випадків, коли дуже важко визначити, який фактор вважається внутрішнім або зовнішнім. Тому необхідно представити відмінності між внутрішніми і зовнішніми зацікавленими сторонами інноваційного проекту.

Нижче запропоновано модель класифікації, яка поєднує внутрішніх та зовнішніх стейкхолдерів проекту.

На проект впливають:

- його внутрішні зацікавлені сторони, які безпосередньо беруть участь у реалізації проекту;



Рис. 1. Модель класифікації стейкхолдерів проекту

• зовнішнє оточення проекту, внутрішнє середовище компанії, в рамках якої реалізується проект, та зовнішнє оточення компанії.

Проведено аналіз властивостей інноваційних проектів, в результаті виявлено низку особливостей, які вимагають введення специфічних стейкхолдерів. Для кожної зацікавленої сторони проекту було виділено ключові показники внеску та стимули (табл. 1–2).

Внутрішні зацікавлені сторони можуть здатися більш важливими через їх близькість до проекту або ініціативи. В «Керівництві з управління проектами» [12] підтверджується, що внутрішні зацікавлені сто-

рони цілком можуть бути «ближчими» до проекту та безпосередньо впливати на його хід. Але їх вплив може бути ключовим тільки в короткостроковій перспективі. Можливо, зовнішні зацікавлені сторони більше впливають на довгостроковий успіх проекту, тому що зовнішні зацікавлені сторони часто бувають кінцевими користувачами або клієнтами. Проте під час перебігу проекту зовнішні зацікавлені сторони мають бути визначеними і керованими. Незважаючи на те, що зовнішні стейкхолдери можуть відчувати себе відволікаючими або далекими від поставленого завдання, було б помилкою виключати їх з аналізу зацікавлених сторін.

Таблиця 1

**Внесок і стимул внутрішніх стейкхолдерів**

Тип	Характеристика	Вклад	Стимул
Наукові співробітники (Scientists)	Організація або фізична особа, яка виконує завдання розробки, включаючи аналіз вимог, проектування, тестування протягом всього життєвого циклу.	технології; інновації; час; професійні навички; знання.	доступ до сучасних технологій проектування; можливість проведення експериментів на сучасному обладнанні; підвищення кваліфікації; винагорода.
Команда проекту (Project Team)	Тимчасова група фахівців, створена на період виконання проекту.	час; професійні навички; залученість до діяльності.	покращення робочої атмосфери; достовірні й актуальні інформація; задоволення роботою; досвід виконання інноваційних проектів; винагорода.
Галузеві фахівці (Industry Specialists)	Група фахівців з основної тематики проекту.	знання; кваліфікація.	безпечні умови праці; укомплектована матеріально-технічна база; правильна конструкторська документація; винагорода.
Інвестори та акціонери (Investors and Shareholders)	Інвестор – це юридична або фізична особа, що вкладає власні, позикові або інші залучені кошти в інвестиційні проекти. Акціонер – юридична або фізична особа, яка є власником акцій акціонерного товариства.	інвестиції.	дивіденди; безпека інвестицій; зростання капіталу.
Керівники (топ менеджмент) (Project Management)	Група керівників організації вищого рівня ієрархії, які щодня несуть відповідальність за ефективне управління цією організацією.	підтримка прийняття рішень; керівництво проектом.	винагорода; влада; престиж.
Фахівець із «зелених технологій» (Green-engineering Specialist)	Спеціаліст, діяльність якого спрямована на підвищення енергоефективності, безпеки й екологічності виробничих процесів і продукції, що виробляється.	час; навички; залученість до діяльності.	доступ до сучасних енергозберігаючих технологій; обмін досвідом із провідними світовими фахівцями із «зелених технологій»; поліпшення екологічної обстановки в світі.

Ефективна взаємодія допомагає перетворити потреби зацікавлених сторін в організаційні цілі та створює основу для розробки ефективної стратегії. Виявлення точки консенсусу або загальної мотивації допомагає групі стейкхолдерів перетворити інвестиції на значимий результат.

Щоб проект був успішним, всі сторони повинні мати чітке розуміння процесу та цілей. Інформація має передаватися цілеспрямовано і послідовно на кожному етапі проекту. Внутрішні та зовнішні зацікавлені сторони мають розуміти бачення і ту роль, яку вони індивідуально відіграють у досягненні цілей організації. Кожен стейкхолдер має розуміти своє значення у проекті та яку саме індивідуальну роль вони відіграють для досягнення спільної мети.

Багато проектів так і не можуть реалізувати свій потенціал, тому що взаємодія із зацікавленими сторонами не була визнана невід’ємною частиною процесу або цьому було приділено мало уваги. Взаємодія зі стейкхолдерами з самого початку допомагає залучити їх у проект та переконати в його успішному завершенні. Необхідно надати достатньо часу для планування, щоб включити всі відповідні сторони і дати їм змогу обговорити, зрозуміти і засвоїти кожну віху проекту. Зацікавленим сторонам, які не розуміють план, важко залишатися залученими і рухатися далі в потрібному напрямі.

Основні переваги управління стейкхолдерами:

- проект буде мати більшу ясність і спільне бачення серед його ключових впливових осіб;

Таблиця 2

**Внесок і стимул зовнішніх стейкхолдерів**

<b>Тип</b>	<b>Характеристика</b>	<b>Вклад</b>	<b>Стимул</b>
Замовник* (Customer*)	Організація або фізична особа, яка отримує продукт або послугу.	вимоги до проекту; вимоги до продукту проекту; гроші; активи організаційного процесу.	інтелектуальна власність; потенційно можливий прибуток; якісний продукт.
Споживачі продукту проекту (Consumers)	Об’єкт (юридична або фізична особа), який є покупцем або користувачем результатів проекту.	уточнення вимог до продукту проекту; зворотний зв’язок; попит.	якість; продукт проекту; цінність.
Підрядні організації (Contractors)	Організація або фізична особа, яка вступає в угоду із замовником про поставки товару або послуги.	довіра; своєчасне виконання замовлення.	своєчасна оплата; довгострокове партнерство.
Урядові органи (Government agencies)	Державна організація, яка здійснює законодавче забезпечення виконання проекту.	лобіювання результатів проекту; залучення в проект.	податки; розвиток регіону.
Наглядова рада (фасилітатор) (Business Analysts)	Організація або фізична особа, яка забезпечує успішну групову комунікацію.	контроль; корекція.	підвищення ефективності реалізації проекту; винагорода.
Ділові партнери (Partners)	Організація або фізична особа, яка вступає в угоду з власником для отримання прав використання об’єкта інтелектуальної власності.	гроші.	прибуток; виробництво інноваційно-затребуваних продуктів.
Місцеві організації та громади (Local Communities)	Об’єкти інфраструктури прилеглих територій.	виконання соціальних зобов’язань.	добробут економічної інфраструктури регіону.

\* у разі стартапів може виступати внутрішнім стейкхолдером.

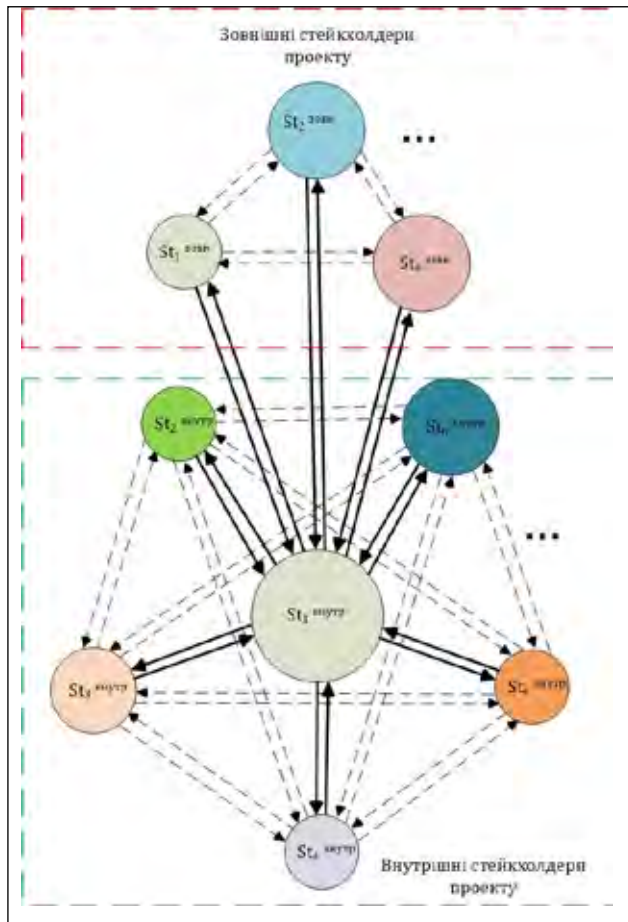


Рис. 2. Модель взаємодії стейкхолдерів інноваційного проекту

- визначення, хто є основними зацікавленими сторонами, і розуміння їхнього ставлення до проекту;
- об'єднання людей включаючи їх знання та досвід для спільного розв'язання проблем;
- визначення стратегії проекту для отримання конкурентної переваги;
- зниження рівня ризику проекту.

Запропоновано модель опису взаємодії між фірмою та стейкхолдерами [14], де використовують модель Ф. Ніколса Accountability Scorecard (ASC), яка є формалізацією системи показників відповідальності.

У рамках побудови моделі ASC відбувається ідентифікація зацікавлених сторін, визначення їх вкладів і стимулів, ранжування стейкхолдерів, вибір показників та інструментів роботи з кожним окремо взятим стейкхолдером загального інноваційного наукомісткого проекту, на підставі яких розробляються рекомендації.

Застосування цієї моделі для ідентифікації зацікавлених сторін при управлінні проектом вимагає певної модифікації, зумовленої специфікою управління проектами. Модель ASC може використовуватися для візуалізації наявної системи відповідальності між зацікавленими сторонами та організацією, яка виконує проект.

Аналіз стейкхолдерів може бути проведений самостійно лідером бізнесу або проекту в процесі особистої консультації з професійним управлінцем, консультантом, коучем або фасилітатором.

Розроблено модель взаємодії стейкхолдерів інноваційного проекту на окремих етапах з урахуванням типу та важливості в проекті. Модель представляє собою схему зв'язків між стейкхолдерами та відображення рівня їхнього впливу на проект. Радіус кіл, відповідних кожному стейкхолдеру, свідчить про величину його впливу.

На рисунку 2 показано модель взаємодії стейкхолдерів інноваційного проекту. Для побудови моделі був застосований системний підхід, за якого стейкхолдери було розглянуто як цілісний комплекс взаємопов'язаних елементів.

Структуризація представленої моделі дає змогу аналізувати взаємодію стейкхолдерів проекту. Так можна чітко виділити зовнішніх і внутрішніх стейкхолдерів. Є центральний внутрішній стейкхолдер (наприклад, керівник проекту)  $St_1^{внутр}$ , який має прямі зв'язки з усіма іншими стейкхолдерами, які, своєю чергою, пов'язані між собою потенційними зв'язками. Тобто як внутрішні, так і зовнішні стейкхолдери можуть мати або прямі зв'язки, або ж взаємодіяти через центрального стейкхолдера. Зовнішні зацікавлені сторони взаємодіють із внутрішніми тільки за допомогою прямого зв'язку з центральним внутрішнім стейкхолдером  $St_1^{внутр}$ .

Таким чином, застосування моделі взаємодії дозволяє корегувати стратегію взаємозв'язків зацікавлених сторін на конкретному етапі. Це покращить ефективність взаємодії стейкхолдерів на наступному етапі.

Побудову моделі взаємозв'язків необхідно виконувати на кожному етапі, тому що зв'язки між стейкхолдерами можуть змінюватися або ж взагалі зникати залежно від етапу проекту.

**Висновки.** Взаємодія стейкхолдерів відіграє важливу роль в усіх типах інноваційних процесів, адже залучення стейкхолдерів до проекту сприяє своєчасному забезпеченню ресурсами і росту інноваційної та ділової активності. Запропонована модель класифікації наглядно демонструє зацікавлені сторони, які можуть бути залучені до інноваційного проекту, а модель взаємодії зацікавлених сторін інноваційного проекту дає змогу комплексно оцінити зв'язки між різними стейкхолдерами.

Перспективним напрямом дослідження є розроблення моделі кількісної оцінки вкладу та стимулу стейкхолдерів, яка б враховувала особливості взаємодії різних зацікавлених сторін.



**Список літератури:**

1. ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016. Інженерія систем і програмного забезпечення. Процеси життєвого циклу систем. Переклад з англ. Чинний від 01.01.2018. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 90 с.
2. Ілляшенко К.В. Менеджмент персоналу. Конспект лекцій для студ. спец. 7.050104 та 8.050104 «Фінанси» усіх форм навчання та слухачів ЦПО. Суми : СумДУ, 2010. 79 с.
3. Рахманова М.С. Разработка методов инновационного стратегического анализа вуза на основе теории заинтересованных сторон : дис. ... канд. экон. наук : 08.00.05. Владивосток : Гос. ун-т экономики и сервиса, 2009. 236 с.
4. Фурга С.Д., Соломатина Т.Б. Карта заинтересованных сторон – инструмент анализа окружения бизнеса. *Инициативы XXI века*. 2010. № 1. С. 22–27.
5. Freeman R. Edward, Phillips R., Sisodia R. Tensions in Stakeholder Theory. *Business & Society*. 2018. 19 p.
6. Freeman R. Edward, Dmytriyev S. Corporate Social Responsibility and Stakeholder Theory: Learning From Each Other. *SYMPHONYA Emerging Issues in Management*. 2017. Pp. 7–15.
7. Bridoux F., Stoelhorst J. W. Stakeholder relationships and social welfare: A behavioral theory of contributions to joint value creation. *Academy of Management Review*. 2016. No. 41. Pp. 229–251.
8. Freeman R. Edward, Harrison J.S., Wicks A.C., Parmar B.L., De Colle S. Stakeholder theory. *The state of the art*. 2010. Vol. 4. No. 1. Pp. 403–445.
9. Keevil A.A. Behavioral stakeholder theory. PhD Thesis. Charlottesville : University of Virginia. 2014. 127 p.
10. Mendelow A. Stakeholder Mapping. *Proceedings of the 2nd International Conference on Information Systems*. 1991. MA : Cambridge. 15 p.
11. Mitchell R.K., Agle B.R., Wood D.J. Toward a Theory of Stakeholder Identification and Salience: Defining the Principle of Who and What Really Counts. *Academy of Management Review*. 1997. Vol. 22. № 4. Pp. 853–888.
12. Rodney Turner J. *Gower Handbook of Project Management: 4th Edition*. Gower e-book. 2007. 912 p.
13. Ильюк В.В. Методологический подход к управлению стейкхолдерами инновационных проектов. *Организатор производства*. 2016. № 4. С. 38–55.
14. Доценко Н. В., Скрынник А. И., Лысенко А. И. Применение модели «Стейкхолдер» для анализа эффективности управления заинтересованными сторонами проекта. *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. 2015. № 1. С. 115–119.

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТЕЙКХОЛДЕРОВ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЕКТА**

*В статье рассмотрены особенности инновационного проекта, предложена модель классификации привлеченных стейкхолдеров и модель взаимодействия заинтересованных сторон инновационного проекта. При разработке модели было рассмотрено наличие внутренних и внешних стейкхолдеров. Также учтены различные типы связей, а именно прямые и косвенные. Детально рассмотрены вклад и стимул для каждой из групп внешних и внутренних стейкхолдеров. Модель дает возможность комплексно оценить взаимодействие между заинтересованными сторонами, учитывая их индивидуальные особенности.*

**Ключевые слова:** стейкхолдер, заинтересованная сторона, взаимодействие, внешние стейкхолдеры, внутренние стейкхолдеры, прямые связи, косвенные связи, стимул, вклад.

**DEVELOPMENT OF THE MODEL FOR INTERACTION ANALYSIS OF INNOVATION PROJECT STAKEHOLDERS**

*The features of the innovation project are discussed in the article. It is proposed the classification model of involved stakeholders, as well as the model of interaction between the stakeholders of the innovation project. Presence of internal and external stakeholders was considered at model development. Also, it was taken into account various types of interaction such as direct and indirect. The contribution and incentive for each of the groups of external and internal stakeholders was considered in details. The model makes it possible to carry out comprehensively assess of the interaction between different stakeholders, taking into account their individual characteristics.*

**Key words:** stakeholder, interaction, external stakeholders, internal stakeholders, direct links, indirect links, incentive, contribution.

УДК 681.518

**Тытук П.В.**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

**Шевченко И.В.**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

## МОДЕЛИ КЛАССИФИКАЦИИ СИТУАЦИЙ И ПРОБЛЕМНЫХ ЗОН НА МЕЖДУНАРОДНЫХ АВТОПЕРЕВОЗКАХ

*В статье предложен комплекс моделей для синтеза системы мониторинга ситуаций и проблемных зон на маршрутах международных автоперевозок. Разработана модель системы мониторинга и древовидная структура проблемных ситуаций. Для классификации ситуаций и проблемных зон используются частотные распределения значений времен и скоростей, а также географические данные. Разработаны алфавиты классов ситуаций и признаков ситуаций.*

**Ключевые слова:** международные автоперевозки, мониторинг, классификация зон и ситуаций, модели.

**Постановка проблемы.** Современный этап развития автотранспортной логистики характеризуется широким внедрением технологий, оборудования, систем контроля и управления перевозками, средств обеспечения безопасности, базирующихся на использовании информации о местоположении транспорта в пространстве и времени. Внедрение и расширение использования современных информационных технологий на автотранспорте является действенным средством повышения качества и скорости выполнения автоперевозок, улучшения экономических показателей автотранспортных предприятий, роста их эффективности и конкурентоспособности.

**Анализ последних исследований и публикаций.** На автотранспорте стало повсеместным применение навигационной системы в автомобилях, индикаторов оперативных данных, предупреждающих о заторах и авариях на пути следования по маршруту, внедрение системы предупреждения столкновений, управление движением с помощью спутниковой связи, что позволяет оптимизировать маршрут движения, а исходя из изменений конъюнктуры – перенацелить мощности на более выгодное направление [1]. Для передачи радиочастотного сигнала используются технические и информационные возможности Международной спутниковой системы мобильной связи Inmarsat-C либо Европейской спутниковой системы мобильной связи Euteltracs, навигационной системы GPS/ГЛОНАСС, низкоорбитальной системы GLOBALSTAR либо среднеорбитальной системы ICO Global [2].

С другой стороны, управление в транспортных системах большой размерности затруднено тем,

что при большом количестве транспорта и маршрутов возрастает степень неопределенности и даже неосведомленности руководства о ситуации с каждой отдельной машиной, которая зачастую транспортирует важный груз. Соответственно, менеджмент перевозок представляет трудности с точки зрения планирования [3].

Определению активности грузовых автомобилей по зарегистрированным данным траектории посвящена работа [4]. Для эффективного визуального мониторинга в статье предлагаются два этапа обработки данных. На первом этапе производится сегментация маршрутов в значимые участки, в то время как на втором этапе происходит автоматическое отображение участков маршрута в классах активности транспортных средств. Метод сегментации маршрута основан на пространственно-временных особенностях траектории. Такой подход помогает справиться с многочисленными пространственными и временными ситуациями, возникающими при перевозках. Указатели на обнаруженные действия и маневры в данных траектории могут использоваться для целей индексации. Особо рассматриваются маневры и остановки транспортных средств. Определение участков маршрута в классах активности машин основано, главным образом, на зарегистрированных данных о траектории и скорости применительно к конкретной дороге. Специфичные для транспортировки данные могут включать географические и описательные данные о фактическом местоположении относительно пунктов назначения грузовых автомобилей, придорожных помещений и заправочных станций. Предварительно

обработанные траектории грузовых автомобилей могут облегчить обнаружение нарушений правил дорожного движения и подозрительного поведения водителя. К сожалению, в работе нет описания математического обеспечения решения указанных задач. Работа [5] посвящена сбору, обработке и составлению отчетов о транспортных средствах в частности для их классификации. Обсуждаются требования, которым должна соответствовать программа классификации транспортных средств, частота сеансов мониторинга, доступное оборудование для сбора данных, программа испытаний оборудования. В этой работе также отсутствует описание математического обеспечения.

Анализ найденных публикаций показал, что, во-первых, задачи разработки средств и методов мониторинга функционирования транспорта на межрегиональных перевозках являются актуальными, а во-вторых, практически не найдено работ, в которых бы ставились задачи разработки математического обеспечения информационных технологий анализа и распознавания ситуаций и проблемных зон на маршрутах движения транспорта.

**Постановка задания.** Целью данной работы является создание интеллектуальной системы мониторинга и классификации проблемных ситуаций и зон на маршрутах межрегионального автотранспорта. После изучения проблемной области и разработки онтологии и концептуальной модели [6] необходимо разработать модели классификации проблемных ситуаций и зон, чему и посвящена настоящая статья.

**Изложение основного материала исследования.** Для разработки моделей классификации проблемных ситуаций и зон необходимо определить структуру исходных данных на уровне онтологии проблемной области. Как можно понять из описания предметной области, основной проблемой (проблемой первого уровня) для транспортной фирмы является повышенный уровень убытков, источниками которых могут быть различные проблемы второго уровня, такие как низкая производительность перевозок, чрезмерные расходы и задержки по времени на отдельных этапах операций и т.п. В свою очередь, низкая производительность является следствием систематически возникающих проблемных ситуаций, то есть проблем третьего уровня. С учётом этого представим онтологию проблемной области в виде [6]:

$$O = \langle E(EA), P1(P2(P3(S))), PS, Z(G), R1, R2, R3, R4, CR, F \rangle, \quad (1)$$

где  $E$  – сущности предметной области,  $EA$  – множество атрибутов сущностей,  $P1$  – множество

проблем первого уровня,  $P2$  – множество проблем второго уровня,  $P3$  – множество проблемных ситуаций,  $S$  – множество признаков проблемных ситуаций и зон,  $PS$  – множество процессов, порождающих проблемы,  $Z$  – множество зон интереса на маршрутах,  $G$  – географическое описание зоны,  $R1 \subseteq P1 \times P2$  – проекция множества проблем первого уровня на множество проблем второго уровня,  $R2 \subseteq P2 \times P3$  – проекция множества проблем второго уровня на множество проблемных ситуаций,  $R3 \subseteq P3 \times S$  – проекция множества проблемных ситуаций на множество признаков,  $R4 \subseteq S \times Z$  – проекция множества признаков проблемных ситуаций на множество проблемных зон,  $CR \subseteq P2 \times S$  – подлежащие определению корреляции между проблемами второго уровня и признаками проблемных ситуаций,  $F$  – множество функций классификации и распознавания проблемных зон.

Формальное описание системы мониторинга и классификации (СМК). Модель системы представим набором:

$$MCMK = \langle F(IS, MS, CS), IS, MM, CM, CA, SW, OS, IU, R \rangle, \quad (2)$$

где  $IS$  – информационная подсистема;  $MS$  – подсистема мониторинга транспортных операций;  $CS$  – подсистема классификации и распознавания;  $IS$  – информационное обеспечение – базы данных и база знаний для распознавания и классификации;  $MM$  – модель мониторинга в виде автоматной модели, отслеживающей динамику состояний транспортных средств [6];  $CM$  – модель классификации зон и ситуаций;  $CA$  – комплекс алгоритмов решения задач мониторинга и классификации;  $SW$  – комплекс инструментальных программных средств, реализующих функциональные задачи СМК;  $OS$  – организационное обеспечение СМК, то есть документы, регламентирующие процессы транспортирования и мониторинга;  $IU$  – интерфейс пользователя;  $R \subseteq IS \times MS \times CS \times IU$  – отношения (связи) между подсистемами.

Далее можно конкретизировать отношение  $R3$  из (1) – проекцию множества проблемных ситуаций на множество признаков. Основой модели классификации является пространство признаков  $S$ . Рассмотрим каждую составляющую этого пространства с точки зрения классификации ситуаций и зон.

**Географические категории.** В множество географических категорий  $GC$ , играющих роль признаков для классификации зон, входят следующие:  $C$  – государство, по территории которого пролегал маршрут;  $CT$  – город;  $B$  – граница;  $LUA$  – зона погрузки-разгрузки. Географические данные

легко получить через систему GPS. Эти данные нужны, во-первых, как признаки для первичной классификации зон, а во-вторых, каждая страна, город, граница и зона погрузки/разгрузки отличаются характерными особенностями, связанными с законодательством, регламентом осмотров и оформления документации, с криминальной обстановкой и пр. Таким образом, географические признаки могут служить дополнительными факторами при распознавании ситуаций.

*Текущие координаты машины.* Текущие координаты машины  $CC$  проецируются на множество географических категорий  $GC$ , и система получает множество актуальных дополнительных данных  $AD$  о стране, а также городе, границе и зоне погрузки-разгрузки, если таковые находятся достаточно близко (согласно нечетким оценкам расстояний).

Формально получение дополнительных данных представим в виде

$$CC \times GC \rightarrow AD. \quad (3)$$

На основании множества предыдущих данных  $CCP$  о координатах машины и известной средней скорости движения  $V^A$  на данном сегменте маршрута легко получить прогнозируемое значение координаты для следующей контрольной временной точки:

$$CC^P \times V^A \times CC. \quad (4)$$

Разность между фактической и прогнозируемой координатами следует нормировать и использовать в качестве признака для определения класса ситуации.

*Скорость движения.* На рис. 1 показано частотное распределение скоростей движения по времени суток. Очевидно, что данный параметр можно использовать и как признак зоны, и как признак соблюдения/несоблюдения режима движения. При получении новых данных о положении машины необходимо вычислить реальную среднюю скорость машины  $Q_y^{TC}$ .

Поскольку к зонам привязаны определенные виды проблемных ситуаций, для каждой известной зоны необходимо составить индивидуальное отношение – таблицу с нечеткими интервалами скоростей движения  $QI$  и нечеткими интервалами времени суток  $TI$  (выражение 5) и с распределением частот используемых скоростей движения. В таблице показаны базовые интервалы скоростей и соответствующие термы нечетких оценок.

$$QI \times TI \rightarrow F^{OT}. \quad (5)$$

Если намечается новая зона, для нее накапливаются данные в аналогичной таблице, и содержимое этой таблицы можно сравнивать с имеющимися таблицами, для которых категории географии и некоторые другие признаки совпадают с новой зоной.

Для распознавания ситуаций удобно рассчитать отклонение  $DQ$  от средней скорости движения. Шкала числовых значений отклонений должна быть интерпретирована в нечетких лингвистических значениях.

*Время прибытия и время убытия.* Для разных зон характерно также время, когда машины въезжают и выезжают из данной зоны. Разные типы зон имеют характерные особенности по вре-

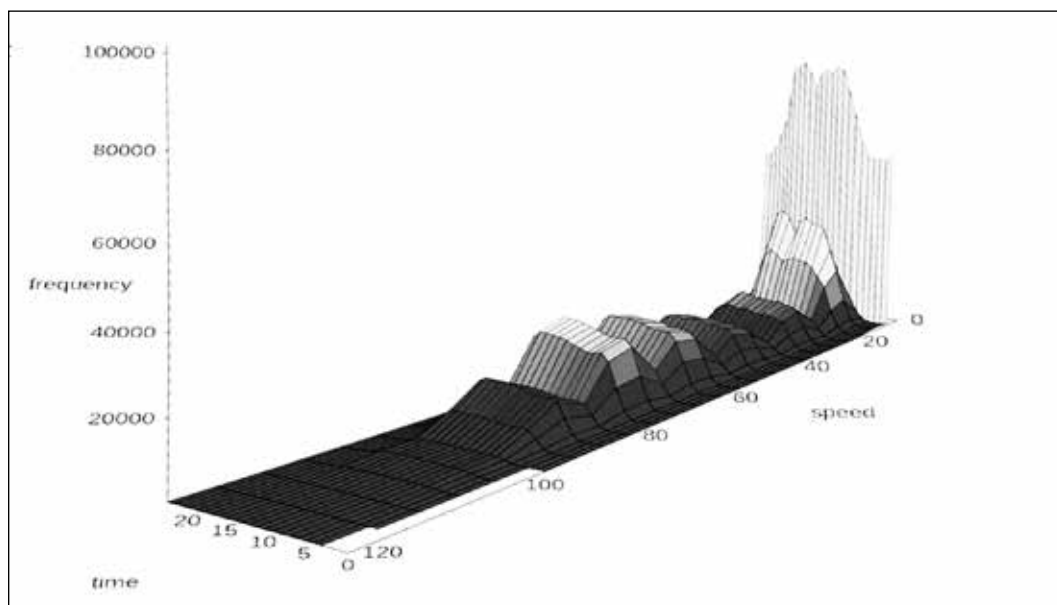


Рис. 1. Частотное распределение скоростей движения по времени суток

мени прибытия и времени убытия, это видно на графиках рис. 2, 3.

Таким образом, имеются основания сформировать отношения «Код зоны – время прибытия – частота» и «Код зоны – время убытия – частота (выражения (6) и (7)

$$Z \times T^A \rightarrow F^A, \quad (6)$$

$$Z \times T^D \rightarrow F^D. \quad (7)$$

Соответственно, признаками для определения ситуации будут отклонение от среднего времени прибытия  $DA$  на основании распределения час-

тот времени прибытия  $F^A$  по известным зонам и отклонение от среднего времени убытия  $DD$  на основании распределения частот времени убытия  $F^D$  по известным зонам.

*Время пребывания в зоне.* На основании предыдущих рассуждений введем признак «Время пребывания в зоне»  $T^S$ . Отношение по этому признаку показано выражением (8).

$$Z \times T^S \rightarrow F^S. \quad (8)$$

Для распознавания ситуаций необходимо рассчитать отклонение  $DS$  от среднего времени

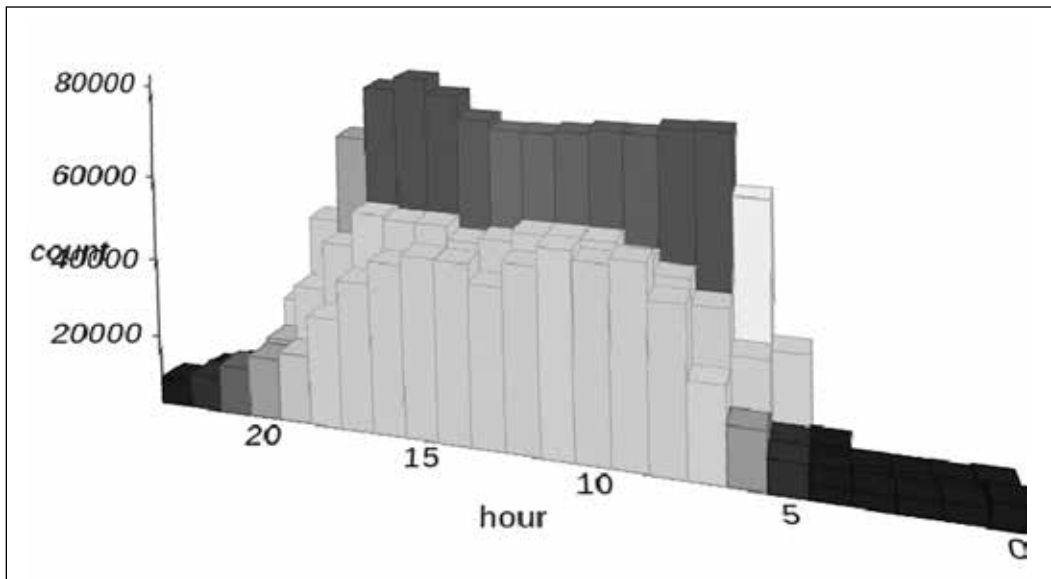


Рис. 2. Частотное распределение времени прибытия

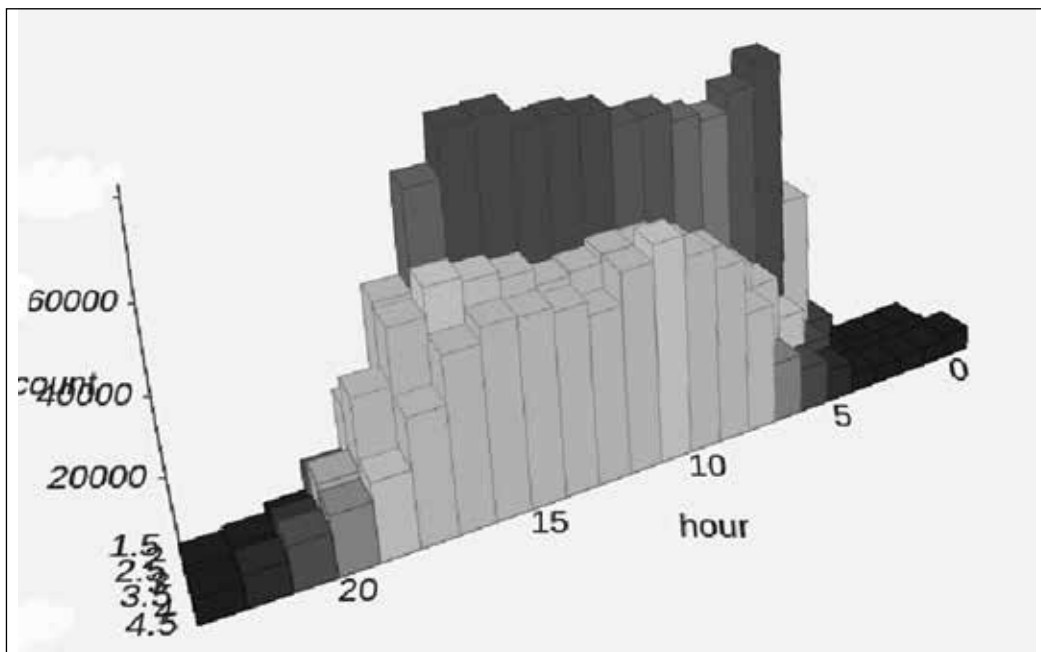


Рис. 3. Частотное распределение времени убытия

пребывания в зоне. Шкала числовых значений отклонений должна быть интерпретирована в нечетких лингвистических значениях.

Таким образом, в пространство признаков  $S$  входят:

– множество географических категорий  $GC = \{C, CT, B, LUA\}$ ;

– отклонение от средней скорости  $DQ$ , определенное на основании распределения частот скоростей движения  $F^{VT}$  по времени суток;

– отклонение от среднего времени прибытия  $DA$ , определенное на основании распределения частот времени прибытия  $F^A$  по известным зонам;

– отклонение от среднего времени убытия  $DD$ , определенное на основании распределения частот времени убытия  $F^D$  по известным зонам;

– отклонение от штатного времени пребывания  $DS$ , определенное на основании распределения частот времени пребывания  $F^S$  в известной зоне.

*Выбор метрики для распознавания ситуаций и зон.* Поскольку основные признаки выражаются в метрических шкалах, но имеют нечетко выраженные интервалы, целесообразно для кластеризации и классификации зон и ситуаций использовать нечеткие расстояния. Кроме того, графики рис. 1–3 демонстрируют разные масштабы изменения значений времени и скорости для разных зон. Это говорит о том, что для каждой оси координат необходимо ввести весовой масштабирующий коэффициент. Необходимо также нормировать шкалы признаков к единому диапазону  $[0, 1]$ . Это значительно облегчит нечеткую интерпретацию значений признаков [7].

*Алфавит проблем второго уровня и их смысловая связь с ситуациями.* Как показал анализ проблемной области, основной проблемой первого уровня является недостаточная прибыль. Малая прибыль может быть следствием низкой эффективности работы транспорта как такового и недостаточной эффективности менеджмента, обусловленной существенной неопределенностью – недостатком информации о текущей ситуации по флоту и невозможностью адекватного реагирования на проблемы на маршрутах, границах, в местах погрузки/выгрузки.

Конкретизируем проекцию  $R2 \subseteq P2 \times P3$  – отношение множества проблем второго уровня на множество проблемных ситуаций, а именно рассмотрим дерево проблем второго уровня, снижающих прибыль, выделим те из них, которые можно связать с ситуациями, которые, в свою очередь, обусловлены перечисленными выше признаками.

1.1 Просроченное выполнение заказов. Причиной могут быть следующие ситуации:

1.1.1 Отсутствие свободных машин в нужном количестве в нужном месте. Проблема обычно является следствием неправильного планирования перевозок.

1.1.2 Несвоевременное оформление документов. Проблема может возникнуть на этапах нахождения в порту, на разгрузке, на перегрузке, при пересечении границы. Проблема определяется задержкой по времени, поэтому может быть включена в алфавит проблем второго уровня.

1.1.3 Недостаточная осведомленность вовлеченных в процесс людей и структур, приводящая к задержкам по времени на разных этапах логистической цепи. Причиной является отсутствие регулярных коммуникаций между подразделениями и отдельными исполнителями. Признаки из пространства  $S$  могут быть использованы в этом случае только для принятия административных мер по улучшению организации связи.

1.2 Длинные маршруты с низким «Profit per kilometer». Это связано с неудачным выбором клиентов и контрактов. Как следствие – большое время транспортировки и вспомогательных операций. Могут возникать следующие ситуации:

1.2.1 Выбор маршрутов без обратной загрузки.

1.3.2 Низкая попутная загрузка.

Проблема и указанные ситуации обычно являются следствием неправильного планирования перевозок. В алфавит проблем второго уровня данную проблему не включаем.

1.3 Маршрут с изменяющимся от случая к случаю временем транспортировки. Причиной может быть:

1.3.1. Пересечение одной или нескольких границ, на которых часто возникают бюрократические проблемы.

1.3.2 Маршрут может проходить через опасные зоны, где происходят кражи машин и грузов.

1.3.3 Длинные маршруты с ночевками, увеличивают расходы на проживание.

1.4 Плохое состояние машин. Причиной может быть:

1.4.1 Несвоевременное обслуживание, приводящее к поломкам и авариям.

1.4.2 Аварии из-за несоблюдения скоростного режима, графика работы, усталости.

1.4.3 Регулярный перерасход топлива при несоблюдении скоростного режима.

Указанные ситуации могут быть полностью распознаны на основании признаков из пространства  $S$ , поскольку для фиксации проблем исполь-

зуются географические и временные характеристики. Однако для распознавания проблемы необходимо иметь дополнительные сведения о режиме эксплуатации машин и статистику аварий.

*Алфавит ситуаций.* При рассмотрении ситуаций нужно учесть, что большинство из них связано с задержками по времени и географией. Различение ситуаций на штатные и нештатные производится с учётом набора используемых признаков пространства  $S$  – (координаты, время, скорость). Перечислим типовые ситуации, ожидаемые на разных этапах транспортировки:

1. Этап движения по маршруту. Типовые ситуации перечислены ниже:

1.1 Ночевка.

1.2 Движение по маршруту.

1.3 Нештатная остановка по невыясненным причинам (возможно, недомогание водителя, поломка, кража машины и/или груза).

Любая из перечисленных ситуаций считается критической или нештатной, если, по данным GPS, имело место превышение среднего времени пребывания в пункте остановки или уменьшение средней скорости движения ниже установленного порога, выраженного нечеткой мерой.

2. Этап пересечения границы.

2.1 Ожидание документов.

2.2 Ночевка.

2.3 Заправка.

2.4 Обслуживание.

2.5 Ожидание в очереди.

2.6 Проверка документов и груза.

2.7 Взвешивание.

Все ситуации характеризуются средней продолжительностью во времени, географически привязаны по данным GPS и могут быть контролируемыми, если имеется соответствующая статистика для формирования значений признаков неблагополучия.

3. Этап погрузки/разгрузки/перегрузки/переупаковки/обслуживания. Типовые рабочие ситуации следующие:

3.1 Погрузка.

3.2 Разгрузка.

3.3 Техобслуживание или дозаправка.

3.4 Ожидание загрузки-разгрузки.

Так же, как и для этапа 2, все ситуации могут быть контролируемыми, если имеется соответствующая статистика для формирования значений признаков неблагополучия.

4. Этап работы в порту. Этот этап характерен тем, что для работы в порту используются специально выделенные машины, которые занимаются

только ввозом/вывозом груза из порта на склад компании (Shunting Services). Остальные машины транспортируют груз со склада компании непосредственно к потребителю или от потребителя на склад, расположенный в непосредственной близости от порта. Перечислим типовые рабочие ситуации:

4.1 Оформление документов на груз.

4.2 Въезд машины в порт, ожидание в очереди.

4.3 Подготовка документов, необходимых для въезда в порт.

4.4 Ожидание загрузки.

4.5 Загрузка и переупаковка.

4.6 Взвешивание.

4.7 Рентгеновское сканирование.

4.8 Выезд из порта.

Здесь также все ситуации могут быть контролируемыми, если имеется соответствующая статистика для формирования значений признаков неблагополучия.

Анализ типовых этапов и ситуаций показывает, что множество классов проблемных и штатных ситуаций  $S^3$  представляет собой множество сочетаний кода этапа транспортной операции  $SC$ , значений координат, значений отклонений времени прибытия (времени убытия), времени пребывания и отклонений скорости, причем в зависимости от кода этапа транспортной операции некоторые их перечисленных признаков могут отсутствовать:

$$S3 = SC \times GC \times DQ \times DA \times DD \times DS. \quad (9)$$

Любое значительное (выраженное в нечеткой шкале) отклонение из множеств  $DQ$ ,  $DA$ ,  $DD$ ,  $DS$  для любой ситуации и множества  $S3$  переводит данную ситуацию во множество проблемных ситуаций  $P3$ :

$$P3 = SC \times GC \times DQ' \cup DA' \cup DD' \cup DS', \quad (10)$$

где  $DQ' \in DQ$ ,  $DA' \in DA$ ,  $DD' \in DD$ ,  $DS' \in DS$  – значительные отклонения на множестве нечетких значений отклонений соответствующих величин.

*Разработка нечеткого интерпретатора для обнаружения критических и нештатных ситуаций.* Распознавание ситуации предполагает определение степени ее критичности. Считаем, что ситуации по степени критичности делятся на три класса: штатная, критическая, нештатная. На первом этапе процедуры определения критичности для каждого признака  $x_i$  из множества  $SF$  фиксируется значение  $x_i^*$  как расстояние от точки номинального значения признака до текущей рабочей точки. На втором этапе вычисляется степень критичности как взвешенная сумма значений признаков [8]:

$$K_s = \sum_{i=1}^{n_s} \alpha_i x_i^* , \quad (11)$$

где  $\alpha_i$  – весовой коэффициент значимости признака с точки зрения критичности ситуации. Для уточненного оценивания значимости признаков в конкретных ситуациях может использоваться метод парных сравнений [9].

На третьем этапе для лингвистической оценки критичности ситуации используется лингвистическая переменная с тремя значениями: «Малая» (в центре кластера номинального режима); «Средняя» – в центре кластера критического режима; «Высокая» – от критической зоны и выше. Нечеткая шкала оценки степени критичности приведена на рис. 4.

После оценки критичности ситуации, в случае, если степень истинности утверждения «Средняя» выше значения 0.45, фиксируется наличие критической ситуации. Если степень истинности утверждения «Высокая» выше значения 0.45, фиксируется наличие нештатной ситуации.

*Модель классификации зон.* Как указывалось выше, классификация зон вообще и обнаруженных новых проблемных зон в частности основывается на сопоставлении частоты возникновения штатных и проблемных ситуаций и их географической принадлежности. Проблемная зона возникает в тех местах, где частота возникновения определенных проблемных ситуаций велика. Обозначим общее количество ситуаций в некото-

рой географической зоне NS. Обозначим общее количество проблемных ситуаций в некоторой географической зоне NP. Тогда относительная частота (в дальнейшем – частота) возникновения проблемных ситуаций  $p_j^3 \in P3$  в некоторой j-й географической зоне  $f_j = NP/NS$ .

Введем порог  $T_f$  для определения истинности высказывания «ситуация проблемная». Обозначив предикат условия критичности ситуации в зоне Pkc, запишем его в виде

$$P_{kc} = \begin{cases} 1 & \text{if } f_j \geq T_f \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} . \quad (12)$$

Таким образом, классификация зон основана на двух основных признаках – географических координатах зоны и частоте возникновения определенных критических ситуаций  $p_j^3 \in P$ . из алфавита ситуаций.

Разработанные модели используются в алгоритмах классификации и распознавания проблемных ситуаций и зон, которые предполагается описать в следующей статье.

**Выводы.** На основании концептуальной модели проблемной области функционирования международного грузового автотранспорта разработано формальное теоретико-множественное описание системы мониторинга транспортных потоков на международных грузовых перевозках, отличающееся наличием динамической автоматной модели, отслеживающей состояния транспортных средств.

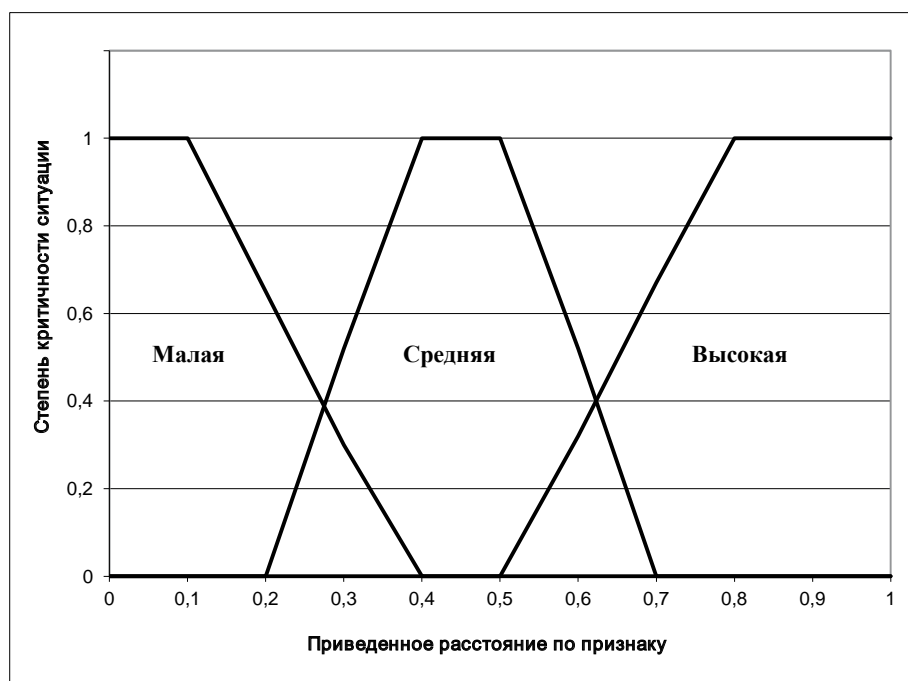


Рис. 4. Лингвистические оценки степени критичности ситуаций



Проблемы транспортных компаний разделены по уровням, и для каждого уровня установлена связь с проблемами нижнего уровня и проблемными ситуациями. Сформированы формальные модели классификации ситуаций и проблемных зон, отличающиеся использованием частотных распределений значений времен и скоростей, а также географических данных, получаемых через систему GPS, что дает возможность синтеза системы мониторинга и распознавания проблемных ситуаций и проблемных зон на маршрутах.

Разработан алфавит классов ситуаций и алфавит признаков ситуаций. Основными признаками ситуаций являются: распределение частот отклонений движения по времени суток, распределение частот отклонений от среднего времени прибытия в зону, распределение частот отклонений от среднего времени убытия из зоны и распределение частот времени пребывания в известной зоне. Для обнаружения критических и нештатных ситуаций разработан нечеткий интерпретатор степени критичности ситуации.

### Список литературы:

1. Michael Wieck. Innovations in Central Data Management for Truck Compliance and Mobility – Vehicle Information in Motion. ITS World Congress 2017 Montreal, October 29. – November 2. URL : [http://www.irdinc.com/public/uploads/downloads/1509636456\\_Central\\_Data\\_Management\\_Truck\\_Compliance\\_ITSWC\\_17.pdf](http://www.irdinc.com/public/uploads/downloads/1509636456_Central_Data_Management_Truck_Compliance_ITSWC_17.pdf).
2. E. McCormack, M. E. Hallenbeck. ITS Devices Used to Collect Truck Data for Performance Benchmarks. Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, No. 1957, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. 2006. P. 43–50.
3. Самойленко М.І. Кобець А.О. Транспортні системи великої вимірності: монографія / за ред. М.І. Самойленка. Харків : Харківська національна академія міського господарства, 2010. 212 с.
4. Zoltán Fazekas, Péter Gáspár, Roland Kovács. Determining Truck Activity from Recorded Trajectory Data. *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 20(2011). P. 796–805.
5. Traffic Monitoring Guide May 1. 2001. URL : <http://web.ewu.edu/groups/cbpanwattap/ttaptraining/trafficmonitoringguide/TMGsection4.pdf>.
6. Тытюк П.В., Шевченко И.В. Мониторинг функционирования транспорта на международных перевозках. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2018. № 6. С. 44–50.
7. Мурашко Ф.Г., Шевченко И.В., Лабзов С.А. Извлечение знаний из баз данных при помощи нейронной сети и нечеткого интерпретатора. *Нові технології*. 2008. № 4. С. 41–45.
8. Шевченко И.В. Дымченко Н.Н, Грицаков С.А. Диагностика неблагоприятных ситуаций в процессе выращивания монокристаллов полупроводников. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2014. № 1. С. 34–43.
9. Говоруха В.Б., Ткачова О.К. Теоретичні основи розробки систем підтримки прийняття рішень. *Вісник Академії митної служби України. Серія : Технічні науки*. 2010. № 2. С. 130–137.

### МОДЕЛІ КЛАСИФІКАЦІЇ СИТУАЦІЙ ТА ПРОБЛЕМНИХ ЗОН НА МІЖНАРОДНИХ АВТОПЕРЕВЕЗЕННЯХ

У статті запропоновано комплекс моделей для синтезу системи моніторингу ситуацій і проблемних зон на маршрутах міжнародних автомобільних перевезень. Розроблено модель системи моніторингу і деревоподібна структуру проблемних ситуацій. Для класифікації ситуацій і проблемних зон використовуються частотні розподіли значень часів і швидкостей, а також географічні дані. Розроблено алфавіти класів ситуацій та ознак ситуацій.

**Ключові слова:** міжнародні автоперевезення, моніторинг, класифікація зон і ситуацій, моделі.

### MODELS OF CLASSIFICATION OF SITUATIONS AND PROBLEM ZONES IN INTERNATIONAL TRANSPORTATION

The article proposes a set of models for the synthesis of a system for monitoring situations and problem areas on international road haulage routes. A model of the monitoring system and a tree structure of problem situations have been developed. To classify situations and problem areas, frequency distributions of times and speeds are used, as well as geographic data. Developed alphabets of classes of situations and signs of situations.

**Key words:** long-distance trucking, monitoring, classification of situations and zones, models.

УДК 004.9:681.5

**Чекурін В.Ф.**

Інститут прикладних проблем механіки і математики імені Я.С. Підстригача  
Національної академії наук України, Куявсько-Поморський університет в Бидгощі, Польща

**Пономарьов Ю.В.**

Науково-дослідний інститут транспортування газу АТ «Укртрансгаз»

**Химко О.М.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## МЕТОД КОНТРОЛЮ ЦІЛІСНОСТІ ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ ЗА ДАНИМИ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ

*У статті запропоновано метод неперервного контролю цілісності лінійної частини магістральних газопроводів на основі даних моніторингу значень тиску і температури газу на входах і виходах усіх вузлових елементів, а також швидкості потоку газу на вході першого вузлового елемента. Метод базується на алгоритмі оброблення даних моніторингу, який дає змогу визначити цілісність усіх елементів із використанням отриманих раніше інтегральних критеріїв. Реалізація методу передбачає створення системи моніторингу, яка містить вузлові пункти автоматичного відбору даних, канали передавання даних, бази даних оперативної інформації.*

**Ключові слова:** магістральний газопровід, лінійні та вузлові елементи, моніторинг параметрів потоків, контроль цілісності.

**Постановка проблеми.** Магістральні газопроводи (далі – МГ) є найбільш ефективним засобом транспортування природного газу на великі відстані. Їхня висока ефективність досягається, зокрема, застосуванням труб великого діаметру та підтриманням високого тиску газу в магістралі за допомогою компресорних станцій (далі – КС).

За тривалої експлуатації надійність технологічних об'єктів газотранспортної системи (далі – ГТС) неминуче знижується. Водночас зростають ризики неконтрольованої розгерметизації об'єктів лінійної частини (ЛЧ) МГ, а отже, і вартість економічних втрат, екологічних та соціальних наслідків від можливих аварій. Технічне обслуговування та планові відновлювальні ремонти дають змогу підтримувати надійність об'єктів ГТС у певних межах. Проте в системі можуть виникати неочікувані події, які створюють загрози порушення цілісності та герметичності об'єктів ГТС. Застосування методів технічної діагностики дає змогу передбачати такі події чи виявляти їх на початкових стадіях, щоб мінімізувати їхні наслідки.

Сучасні підходи до організації безпечної експлуатації газотранспортних систем передбачають відхід від періодичної сертифікації технологічних об'єктів ГТС на користь неперервного управління їхнім технічним станом і цілісністю. З цією метою

створюють системи управління цілісністю трубопроводів (англ. Pipeline Integrity Management Systems – PIMS) [1]. Ключовими функціями цих систем є діагностика технічного стану об'єктів, виявлення загроз порушення їхньої цілісності, оцінювання ризиків, планування, розроблення та реалізація заходів для запобігання подій, пов'язаних зі порушенням цілісності технологічних об'єктів [1; 2]. Всі ці проблеми повною мірою стосуються ГТС України. Тому актуальною є проблема розроблення методології неперервного контролю цілісності МГ із метою забезпечення безпечної експлуатації газотранспортної системи відповідно до нормативних документів [3–5].

Відомі різні методи контролю цілісності МГ, які використовують ті чи інші інформативні ознаки [6]. Серед них можна виокремити, зокрема, методи, які базуються на виявленні витоків [7]. Огляд цих методів поданий, зокрема, у статті «A survey on gas leak detection and localization techniques» [8]. Особливе місце серед цих методів посідають методи моделювання газодинамічних процесів у реальному часі (англ. Real Time Transient Modeling – RTTM) [7]. Як вхідні дані тут використовують значення параметрів газового потоку у трубопроводі (тиску, температури, швидкості потоку чи витрати), виміряні у певній

множині точок вздовж його траси. Основним компонентом у системах виявлення витоків, які реалізують такий підхід, є програмне забезпечення, призначене для відбору даних і розв'язування відповідних прямих і обернених задач газової динаміки. Тому їх слід зарахувати до так званих SIS-систем (англ. Software Intensive Systems). Розробленню математичних моделей, методів, алгоритмів і принципів побудови систем виявлення витоків із використанням РТТМ присвячено багато публікацій [9–11].

У статті «Математична модель для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу» [6], з огляду на систему рівнянь моделі газової динаміки та з використанням чисельних розв'язків крайових задач, сформульованих у рамках цієї моделі, побудовано функціонали для лінійних і вузлових елементів, які в інтегральній формі визначають відхилення від законів збереження маси та імпульсу газу в елементі. Функціонали залежать від функцій, які визначають зміну в часі параметрів газових потоків на вході та виході відповідних елементів. Із використанням отриманих функціоналів сформульовані критерії цілісності лінійних і вузлових елементів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення з використанням критеріїв, запропонованих у статті «Математична модель для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу» [6], методики неперервного контролю цілісності лінійної частини МГ на основі даних моніторингу параметрів газових потоків у трубопроводах.

**Алгоритм неперервного контролю цілісності МГ.** Згідно з моделлю структури МГ, запропонованою у статті «Математична модель для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу» [6], розглядатимемо ЛЧ МГ як послідовність  $[S_\lambda : \lambda = 1, 2, \dots, N]$  секцій  $S_\lambda$  (відрізків МГ між двома КС), де  $N$  – кількість секцій у МГ. Кожна секція  $S_\lambda$ , своєю чергою, являє собою послідовність послідовно з'єднаних вузлових  $NE_{\lambda,j}, j = 1, 2, \dots, N_\lambda + 1$  і лінійних  $LE_{\lambda,i}, i = 1, 2, \dots, N_\lambda$ , де  $N_\lambda$  – кількість лінійних елементів у секції. Перший  $NE_{\lambda,1}$  й останній  $NE_{\lambda,N_\lambda+1}$  у цій послідовності є вузлами підключення до КС.

У моделі структури МГ лінійні елементи  $LE_{\lambda,i}$  представляють довгі відрізки труб. Кожен елемент  $LE_{\lambda,i}$ , за згаданою вище статтею [6], характеризується певними властивостями – сукупностями геометричних  $GL_{\lambda,i}$  і фізичних  $PhL_{\lambda,i}$  параметрів математичної моделі руху газу через лінійний еле-

мент. Ця модель містить диференціальні рівняння з частинними похідними, залежними від часової  $t$  і просторової  $x$  координат. Отримані в рамках цієї моделі функціонали і критерії цілісності елементів  $LE_{\lambda,i}$  також залежать від параметрів  $GL_{\lambda,i}$  та  $PhL_{\lambda,i}$ .

Натомість вузлові елементи  $NE_{\lambda,j}$  представляють у цій моделі складники малої протяжності – кранові вузли, вузли підключення до КС і підземних сховищ газу, труби-перемички, газвимірювальні блоки, пункти редукування газу тощо. Вони, як і лінійні елементи, характеризуються множинами геометричних  $GN_{\lambda,j}$  і фізичних  $PhN_{\lambda,j}$  параметрів математичної моделі руху газу через вузловий елемент  $NE_{\lambda,j}$ . Ця модель містить звичайні диференціальні рівняння, залежні лише від часової змінної [6]. Отримані в рамках цієї моделі критерії цілісності елементів  $NE_{\lambda,j}$  також залежать від параметрів  $GN_{\lambda,j}$  та  $PhN_{\lambda,j}$ .

За моделлю структури МГ, контроль цілісності ЛЧ зводиться до контролю цілісності усіх вузлових і лінійних елементів усіх секцій: ЛЧ МГ є цілісною, якщо усі секції  $\{S_\lambda \forall \lambda = 1, 2, \dots, N\}$  у його складі є цілісними, а будь-яка секція  $S_\lambda$  цілісна, якщо усі вузлові  $\{NE_{\lambda,j} \forall j = 1, 2, \dots, N_\lambda + 1\}$  і усі лінійні  $\{LE_{\lambda,i} \forall i = 1, 2, \dots, N_\lambda\}$  елементи цієї секції цілісні. Тож процес контролю цілісності МГ містить вкладені ітераційні процеси контролю цілісності секцій, а ці, своєю чергою, – процеси контролю цілісності вузлових і лінійних елементів (рис. 1).

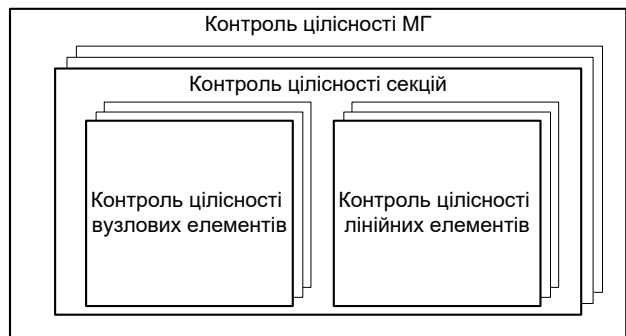


Рис. 1. Процес контролю цілісності МГ

За ознаку цілісності вузлових і лінійних елементів приймемо змінні  $IN_{\lambda,i}$  і  $IL_{\lambda,i}$ , які набувають значень 1 або 0

$$IN_{\lambda,i} = \begin{cases} 1 & NE_{\lambda,i} \text{ is integral} \\ 0 & \text{otherway} \end{cases}, \quad IL_{\lambda,i} = \begin{cases} 1 & NL_{\lambda,i} \text{ is integral} \\ 0 & \text{otherway} \end{cases}, \quad (1)$$

залежно від того, чи відповідні вузлові і лінійні елементи задовольняють їхні умови цілісності [6].

Змінна  $I_{S_\lambda}$  визначає стан цілісності секції  $S_\lambda$ : вона набуває значення 1, коли всі вузлові і всі

лінійні елементи в секції задовольняють їхні критерії цілісності, і значення 0, коли хоча б одна із цих двох груп елементів не задовольняє його критерій цілісності. Значення цієї змінної можна обчислити, зокрема, так

$$IS_{\lambda} = \prod_{i=1}^{N_{\lambda}} IL_{\lambda,i} \cdot \prod_{i=1}^{N_{\lambda}+1} IN_{\lambda,i} \quad (2)$$

З метою забезпечення неперервності контролю процес контролю цілісності ЛЧ МГ «Main» (рис. 2) організований як нескінченний цикл. Блок «Section» у цьому процесі позначає алгоритм контролю цілісності секції, блок-схема якого показана на рис. 3. Модуль «Section» – це алгоритм, який визначає значення змінної  $IS_{\lambda}$ , що є ознакою цілісності секції  $\lambda$ , а також обчислює списки вузлових  $[NE_{\lambda,i}]_{broken}$  і лінійних  $[LE_{\lambda,i}]_{broken}$  елементів, які не задовольняють їхні критерії цілісності [6]. Цей алгоритм за необхідності може повертати також значення інтенсивності витoku для усіх елементів зі списків  $[NE_{\lambda,i}]_{broken}$  та  $[LE_{\lambda,i}]_{broken}$ . Блок «Calculation of  $[S_{\lambda}]_{broken}$ » в алгоритмі «Main» формує список секцій  $[S_{\lambda}]_{broken}$ , для яких не виконується критерій цілісності. Для цього використовуються змінні  $IN_{\lambda,i}$  та  $IL_{\lambda,i}$ . Змінна логічного типу  $IM$  є ознакою цілісності МГ:

$$IM = \begin{cases} 1 & IS_{\lambda} = 1 \forall \lambda = 1, 2, \dots, N \\ 0 & \text{otherway} \end{cases} \quad (3)$$

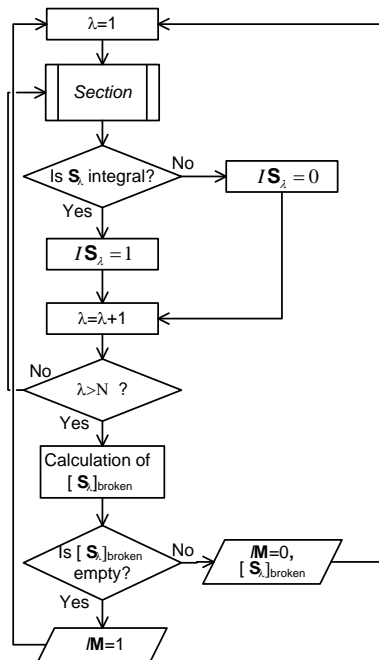


Рис. 2. Блок-схема алгоритму Main контролю цілісності МГ

За критеріями цілісності вузлових і лінійних елементів [6], для контролю цілісності будь-якого елемента необхідні дані про значення температури

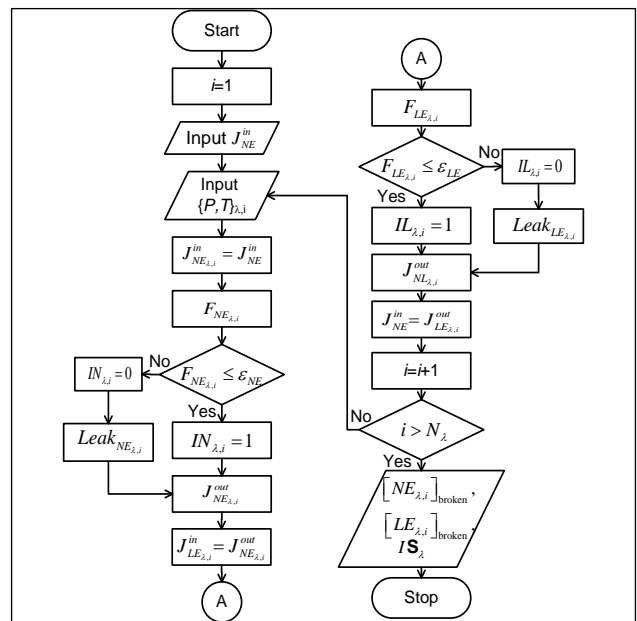


Рис. 3. Блок-схема алгоритму Section контролю цілісності секції МГ

$T$  та тиску  $P$  на його вході ( $in$ ) і виході ( $out$ ), а також значення густини масового потоку  $J$  на його вході. Оскільки вихід вузлового елемента  $i$ -тої ділянки є одночасно входом її лінійного елемента, а його вихід є входом вузлового елемента наступної ( $i+1$ )-шої ділянки, то виконуються умови:

$$\begin{aligned} P_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t) &= P_{NE_{\lambda,i}}^{out}(t), & P_{NE_{\lambda,i}}^{out}(t) &= P_{NE_{\lambda,i+1}}^{in}(t), \\ T_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t) &= T_{NE_{\lambda,i}}^{out}(t), & T_{LE_{\lambda,i}}^{out}(t) &= T_{NE_{\lambda,i+1}}^{in}(t), \\ J_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t) &= J_{NE_{\lambda,i}}^{out}(t), & J_{LE_{\lambda,i}}^{out}(t) &= J_{NE_{\lambda,i+1}}^{in}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

Тож, щоб визначити значення тиску і температури газу на входах усіх елементів секції, достатньо ввести в алгоритм «Section» результати вимірювань цих параметрів лише на входах і виходах усіх вузлових елементів (блок «Input  $\{P, T\}_{\lambda,i}$ »). Проте цих даних буде недостатньо, щоб реалізувати алгоритм контролю цілісності вузлових і лінійних елементів, необхідно задати також густини потоків маси  $J_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t)$  і  $J_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t)$  на їхніх входах. Із цією метою в алгоритм передається значення масового потоку на вході першого вузлового елемента (змінна  $J_{NE}^{in} = J_{NE_{\lambda,1}}^{in}$ ). Для визначення  $J_{NE_{\lambda,1}}^{in}$  можна виміряти значення швидкості  $V_{NT_{\lambda,1}}^{in}$  і, використовуючи дані вимірювань тиску  $P_{NE_{\lambda,1}}^{in}$  та температури  $T_{NE_{\lambda,1}}^{in}$ , обчислити за рівнянням стану газу [6] густину маси  $\rho_{NE_{\lambda,1}}^{in}$  на вході першого елемента, а отже, знайти густину масового потоку  $J_{NE_{\lambda,1}}^{in} = \rho_{NE_{\lambda,1}}^{in} V_{NT_{\lambda,1}}^{in}$ .

Тепер отриманих даних

$$\{J^{in}(t), P^{in}, T^{in}, P^{out}, T^{out}\}_{NE_{\lambda,1}}$$

вистачає, щоб обчислити функціонал  $F_{NE_{\lambda,1}}$  для першого вузлового елемента і перевірити вико-

нання критерію його цілісності  $F_{NE_{\lambda,1}} \leq \varepsilon_{NE}$ . Отже, використовуючи математичну модель руху газу через вузловий елемент [6], можна визначити інтенсивність витоку  $Leak_{NE_{\lambda,1}}$  (якщо його цілісність порушена) й обчислити густину масового потоку  $J_{NE_{\lambda,1}}^{out}(t)$  на виході цього вузлового елемента. Так буде встановлено масовий потік на вході лінійного елемента цієї ділянки  $J_{LE_{\lambda,1}}^{in}(t) = J_{NE_{\lambda,1}}^{out}(t)$ . Тепер, використовуючи дані  $\{J^{in}(t), P^{in}, T^{in}, P^{out}, T^{out}\}_{LE_{\lambda,1}}$  для лінійного елемента, можна розрахувати для нього значення функціоналу  $F_{LE_{\lambda,1}}$  і перевірити виконання критерію цілісності  $F_{LE_{\lambda,1}} \leq \varepsilon_{LE_{\lambda,1}}$ . Таким чином, використовуючи математичну модель руху газу через лінійний елемент [6], можна визначити інтенсивність витоку  $Leak_{LE_{\lambda,1}}$  (якщо його цілісність порушена) й обчислити густину масового потоку  $J_{LE_{\lambda,1}}^{out}(t)$  на виході цього вузлового елемента. Блок « $J_{NE}^{in}(t) = J_{LE_{\lambda,1}}^{out}(t)$ » приписує розраховане значення потоку змінній  $J_{NE}^{in}(t)$ . В наступному циклі петлі, керованої блоком умовного переходу « $i > N_\lambda$ », ця змінна визначає вхідний потік маси  $J_{NE_{\lambda,i+1}}^{in}(t)$  вузлового елемента наступної ділянки (блок « $J_{NE_{\lambda,i}}^{in} = J_{NE}^{in}$ »). Ітераційний процес продовжується аж до виконання умови  $i > N_\lambda$ . Після цього алгоритм «Section» обчислює та повертає списки вузлових  $[NE_{\lambda,i}]_{broken}$  та лінійних  $[LE_{\lambda,i}]_{broken}$  елементів, для яких не задовольняються критерії цілісності, а також значення змінної  $IS_\lambda$ , яка є ознакою цілісності секції  $S_\lambda$ .

**Схема відбору даних.** Згідно з Правилами [5] (п. 18.3.г), на «ЛЧ МГ виконується контроль та вимірювання параметрів (моніторинг) у режимі реального часу за допомогою стаціонарно встановлених датчиків». На рис. 4 показана схема відбору даних на гіпотетичній секції  $S_\lambda$  МГ між компресорними станціями  $CS_\lambda$  і  $CS_{\lambda+1}$ .

Секція складається із  $N_\lambda$  лінійних і  $N_\lambda + 1$  вузлових елементів. На вході і виході кожного вузлового елемента  $NE_{\lambda,i}, i = 1, 2, \dots, N_\lambda$  із визначеним періодом  $\tau_{inst}$  автоматично вимірюються миттєві значення тиску  $P$  і температури  $T$  газу. Якщо значення витрати газу на виході із компресорної станції  $CS_\lambda$  невідоме (відсутні штатні засоби вимірювання витрати), то на вході першого вузло-

вого елемента  $NE_{\lambda,1}$  додатково вимірюються значення швидкості руху газу  $V$  в трубі. Це можна реалізувати, наприклад, із використанням накладних чи стаціонарних ультразвукових вимірювачів [12]. Як зазначалося, отримані дані щодо швидкості, тиску та температури газу на вході першого вузлового елемента дають змогу розраховувати густину масового потоку у цій точці (змінна  $J_{NE}^{in}$ ), а отже, розпочати ітераційний процес контролю цілісності вузлових і лінійних елементів, починаючи від  $NE_{\lambda,1}$  і закінчуючи  $NE_{\lambda,N_\lambda+1}$ . Якщо вимірювання швидкості  $V$  газу проводити також і на виході останнього вузлового елемента  $NE_{\lambda,N_\lambda+1}$ , то це дозволить реалізувати алгоритм «Section» у зворотному напрямі – від  $NE_{\lambda,N_\lambda+1}$  до  $NE_{\lambda,1}$ . Необхідність у вимірюванні значень швидкості газу на вході першого (виході останнього) вузлового елемента відпадає, якщо відомі дані щодо значень витрати у цих точках секції, визначені штатними засобами вимірювань, встановленими на ЛЧ МГ.

Результати вимірювань параметрів потоку на входах і виходах вузлових елементів у цифровому вигляді буферизуються на накопичувачах вузлових пунктів моніторингу параметрів потоків, встановлених безпосередньо на майданчиках вузлових елементів (наприклад, на майданчиках кранових вузлів), звідки передаються каналами зв'язку на пункт контролю цілісності секцій. Тут ці дані піддаються цифровій фільтрації з метою усунення шумів, а отже, накопичуються у відповідних базах даних, доступних для програмних систем контролю цілісності.

**Організація обчислень.** Метод контролю цілісності ЛЧ МГ, який тут розглядаємо, передбачає використання в критеріальних співвідношеннях [6] для вузлових і лінійних елементів значень відповідних функціоналів  $F_{NE_{\lambda,i}}$  і  $F_{LE_{\lambda,i}}$ , обчислених на заданих часових проміжках. Обчислені значення функціоналів  $F_{NE_{\lambda,i}}$  і  $F_{LE_{\lambda,i}}$  залежать від значень масового потоку на входах усіх елементів, а також тиску і температури на їхніх входах і виходах, заданих як функції часу на проміжках  $[t_1, t_2]$ , для яких вони обчислюються:

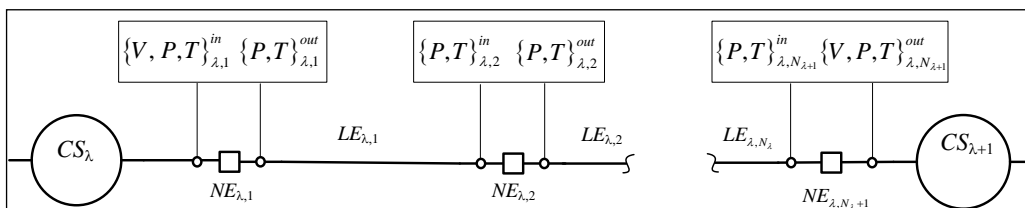


Рис. 4. Схема відбору даних на секції магістрального газопроводу

$$F_{NE_{\lambda,i}} = \int_{t_1}^{t_2} f_{NE} (J_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t)) dt, \quad (5)$$

$$F_{LE_{\lambda,i}} = \int_{t_1}^{t_2} f_{LE} (J_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t)) dt.$$

Тут  $f_{NE}$  та  $f_{LE}$  – підінтегральні функції для функціоналів вузлового та лінійного елементів.

Згідно з алгоритмом «Section», контроль цілісності вузлових і лінійних елементів здійснюється послідовно, оскільки в обчисленнях, які виконуються для кожного наступного елемента, використовуються результати обчислень, виконаних для його попередника. Наприклад, для контролю цілісності лінійного елемента  $LE_{\lambda,i}$  використовуються функція  $J_{NE_{\lambda,i}}^{out}(t)$ , розрахована для вузлового елемента  $NE_{\lambda,i}$ , а для контролю цілісності елемента  $NE_{\lambda,i+1}$  використовується функція  $J_{LE_{\lambda,i}}^{out}(t)$ , обчислена для  $LE_{\lambda,i}$ . Тому, виконуючи послідовний контроль цілісності елементів секції, функціонали  $F_{NE_{\lambda,i}}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_{\lambda}$  та  $F_{LE_{\lambda,i}}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_{\lambda} + 1$  необхідно обчислювати на одному і тому ж часовому інтервалі (позначимо його тривалість  $\tau_{sec}$ ). Зазначимо, що від  $\tau_{sec}$  залежить чутливість методу, тобто мінімальне значення витoku, яке можна виявити, використовуючи цей метод. Це пояснюється тим, що значення функціоналів (4) визначають два чинники – розбаланс маси (*leak*), який виникає на елементі за проміжок часу  $\tau_{sec}$ , якщо він негерметичний, та похибки (*error*) вимірювань і обчислень:

$$F_{NE_{\lambda,i}} = \varepsilon_{NE_{\lambda,i}}^{leak} + \varepsilon_{NE_{\lambda,i}}^{error}, \quad F_{LE_{\lambda,i}} = \varepsilon_{LE_{\lambda,i}}^{leak} + \varepsilon_{LE_{\lambda,i}}^{error}$$

Тому за малих витоків, коли цей проміжок занадто малий, значення похибок  $\varepsilon_{NE_{\lambda,i}}^{error}$  та  $\varepsilon_{LE_{\lambda,i}}^{error}$  можуть значно переважати відповідні значення складників  $\varepsilon_{NE_{\lambda,i}}^{leak}$  та  $\varepsilon_{LE_{\lambda,i}}^{leak}$ , зумовлених витокami. Збільшення інтервалу  $\tau_{sec}$  підвищує чутливість, проте призводить до зниження швидкодії, тобто зростання проміжку часу, необхідного для виявлення розгерметизації секції.

Неперервність контролю секції досягається циклічним застосуванням алгоритму «Section» в алгоритмі «Main». На кожному циклі встановлюються ознаки цілісності усіх вузлових і лінійних елементів і робиться висновок про цілісність усієї секції на послідовних проміжках часу тривалості  $\tau_{sec}$ .

Робота алгоритму «Section» на кожному циклі розпочинається зі зчитування даних у пам'ять комп'ютера з бази даних моніторингу, починаючи від останнього (на момент  $t$  початку циклу) запису аж до запису, який відповідає моменту часу  $t - \tau_{sec}$ . На основі цих даних, отриманих за проміжок часу  $[t - \tau_{sec}, t]$ , алгоритм встановлює ознаки цілісності усіх елементів і секції загалом

для цього проміжку. Для цього він формує усі функції, необхідні для обчислення функціоналів (4). З цією метою на основі отриманої множини вхідних даних, використовуючи методи інтерполяції та екстраполяції, створюється двовимірний масив  $4 \cdot (N_{\lambda} + 1) + 1$ , стовпчики якого відповідають параметрам  $V_{NE_{\lambda,i}}^{in}$ ,  $P_{NE_{\lambda,i}}^{in}$ ,  $T_{NE_{\lambda,i}}^{in}$ ,  $P_{NE_{\lambda,i}}^{in}$ ,  $T_{NE_{\lambda,i}}^{in}$ ,  $i = 1, 2, \dots, N_{\lambda} + 1$ , а стрічки – моментам часу  $t_k \in [t - \tau_{sec}, t]$ . З використанням даних цього масиву, співвідношень (4), а також математичних моделей, які описують рух газу через вузлові та лінійні елементи, в процесі виконання алгоритму Section обчислюються функції

$$J_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), \quad (5)$$

$$T_{NE_{\lambda,i}}^{in}(t), t \in [t - \tau_{sec}, t], \forall i = 1, 2, \dots, N_{\lambda} + 1,$$

$$J_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), T_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), P_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t),$$

$$T_{LE_{\lambda,i}}^{in}(t), t \in [t - \tau_{sec}, t], \forall i = 1, 2, \dots, N_{\lambda},$$

які необхідні для контролю цілісності вузлових і лінійних елементів. Отже, послідовно виконуються обчислювальні процеси згідно з блок-схемою рис. 3.

Нехай  $\tau_{alg}$  машинний час, необхідний для реалізації алгоритму Section у його застосуванні до оброблення даних, отриманих на проміжку часу  $\tau_{sec}$ . Тож цикл, який розпочався у момент часу, завершиться у момент часу  $t + \tau_{alg}$ . Оскільки параметри потоку в МГ змінюються доволі повільно, то зазвичай  $\tau_{alg} \ll \tau_{sec}$ . Тому, щоб отримати цілком нові дані на наступний цикл, необхідна часова затримка  $\tau_{delay}$  у роботі алгоритму тривалістю  $\tau_{sec} - \tau_{alg}$ . Однак, якщо вибрати тривалість  $\tau_{delay}$  затримки, меншою від  $\tau_{sec} - \tau_{alg}$ , так, щоб задовольнялися умови  $\tau_{alg} < \tau_{delay} < \tau_{sec} - \tau_{alg}$ , то наступні цикли алгоритму «Section» будуть реалізуватися на вхідних даних, які частково перекриваються даними попередніх циклів (див. рис. 5).

На рис. 5 показана схема відбору даних для виконання алгоритму «Section» на різних циклах його роботи. Множини вхідних даних для різних циклів зображені заштрихованими прямокутними смужками. Розташування смужок на осі часу (*Time*) визначають часові періоди, на яких були отримані відповідні дані. Оскільки система моніторингу параметрів здійснює заміри параметрів потоку з фіксованою дискретністю, то об'єм вхідних даних на усіх циклах однаковий. Проте множини вхідних даних на різних циклах роботи алгоритму різні – вони відповідають різним часовим періодам:

$$[t - c \cdot \tau_{sec} - (c - 1) \cdot \tau_{delay}, t - (c - 1) \cdot \tau_{sec} - (c - 1) \cdot \tau_{delay}]$$

де  $c$  – номер циклу,  $t$  – момент початку першого циклу (для якого  $c = 1$ ).

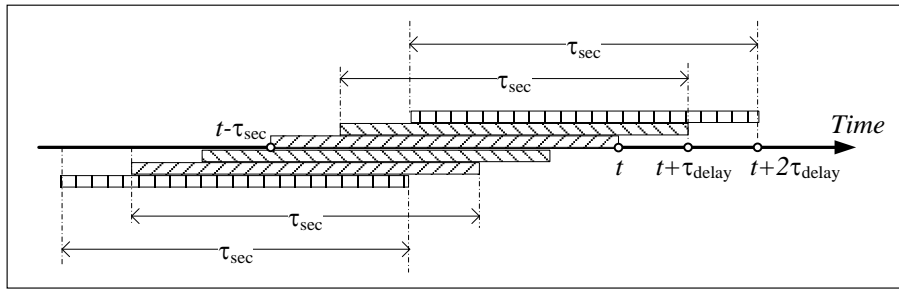


Рис. 5. Схема відбору вхідних даних для алгоритму «Section» на послідовних циклах його виконання

Така схема відбору вхідних даних для алгоритму «Section» дозволяє підвищити надійність системи контролю цілісності, оскільки отримані дані обробляються на кількох послідовних циклах роботи алгоритму. Змінюючи ці два параметри ( $\tau_{\text{sec}}$  і  $\tau_{\text{delay}}$ ), можна налаштувати систему неперервного контролю цілісності секції, залежно від режимів роботи МГ та технологічних потреб.

**Висновки.** Запропоновано метод неперервного контролю цілісності ЛЧ МГ на основі даних моніторингу значень тиску і температури газу на входах і виходах усіх вузлових елементів, а також швидкості потоку газу на вході першого вузлового елемента. Метод базується на алгоритмі оброблення даних моніторингу, який дає змогу визначити цілісність усіх елементів із використанням отриманих раніше інтегральних критеріїв.

Задля реалізації методу необхідно створити систему моніторингу параметрів потоків, яка складається із вузлових пунктів автоматичного відбору даних, підсистеми передавання даних і баз даних оперативної інформації. Вузлові пункти відбору даних можна облаштувати безпосередньо на майданчиках вузлових елементів (наприклад кранових вузлів) та оснастити їх відповідними пристроями для автоматичного вимірювання тиску і температури газу, які наявні на ринку вимірювального обладнання для газової промисловості в широкому асортименті. Задля вимірювання швидкості потоку можна використати наявні накладні чи стаціонарні ультразвукові вимірювачі.

Істотною перевагою методу є те, що його реалізація не вимагає втручання в технологічні процеси транспортування газу, реконструкції трубопроводів, проведення земляних робіт, екскавації тощо. Задля створення системи моніто-

рингу можна використати наявні вимірювальні засоби, лінії зв'язку, а також інтегрувати її в SCADA систему автоматизації ЛЧ.

Чутливість методу обмежується похибками вимірювання параметрів потоку (значень швидкості на вході першого вузлового елемента, тиску і температури газу на входах і виходах усіх вузлових елементів), а також похибками обчислень. Значення густини масового потоку на входах усіх вузлових і лінійних елементів, які необхідні для обчислення критеріальних функціоналів цих елементів, послідовно розраховуються з використанням математичних моделей руху газу через ці елементи. Це може спричинити накопичення похибок обчислень для елементів, розташованих наприкінці секції, і, як наслідок, до зниження чутливості методу для цих елементів.

Цей ефект можна знівелювати, якщо вимірювати швидкість потоку не тільки на вході першого вузлового елемента, але і на виході останнього. Тоді можна запускати два ітераційних процеси «Section»: один у прямому напрямі, як показано на рис. 3, а другий у зворотному – від  $NE_{\lambda, N_{\lambda}+1}$  до  $NE_{\lambda, 1}$ , а рішення щодо цілісності секції приймати, з огляду на результати обчислень обох процесів. Щоб зменшити ефект накопичення похибок, необхідно також застосувати більш точну модель руху газу через вузловий елемент. Із цією метою варто врахувати в рівнянні балансу імпульсу для цього елемента силу інерції та локальний гідравлічний опір.

Щоб отримати кількісні оцінки чутливості і швидкодії методу, необхідно дослідити вплив неточності математичних моделей, похибок вимірювань і обчислень на значення критеріальних функціоналів, що вимагає окремого розгляду. Спеціального розгляду вимагає також проблема контролю цілісності технологічних об'єктів компресорних станцій.

**Список літератури:**

1. Mora R.G., Hopkins P., Cote E. I., Shie T. Pipeline Integrity Management Systems: A Practical Approach. US : ASME Press, 2016. 350 p.
2. Gabbar H.A. and Kishawy H.A. Framework of pipeline integrity management. *J. Process Systems Engineering*. 2011. Vol. 1, Nos. ¾. P. 215–236.
3. Про об'єкти підвищеної небезпеки : Закон України від 18 січня 2001 р. № 2245-III / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14>.
4. Постанова Кабінету Міністрів України «Про ідентифікацію та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки» / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/956-2002-п>.
5. Правила безпечної експлуатації магістральних газопроводів. Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0292-10#o37>.
6. Чекурін В.Ф., Химко О.Я. Математична модель для контролю цілісності лінійної частини магістрального газопроводу. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. 30 (69). № 1 (ч. 1). С. 158–164.
7. Leak Detection Based Pipeline Integrity Systems. Guidance note. Glasgow: TUV NEL Ltd, 2010. 7 p.
8. Murvay P.-S., Silea I. A survey on gas leak detection and localization techniques. *Journal of Loss Prevention in the Process Industry*. 2012. № 25. Pp. 966–973.
9. Чекурін В., Химко О. Математичні моделі для ідентифікації витоків у довгому газопроводі. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2017. Вип. 25. С. 157–169.
10. Чекурін В., Химко О. Чисельне дослідження перехідних процесів у довгому газопроводі, спричинених розгерметизацією. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2017. Вип. 26. С. 100–111.
11. Чекурін В.Ф., Химко О.М. Моделювання системи виявлення та ідентифікації витоків у магістральних газопроводах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. Вип. 29 (68). № 1. С. 44–48.
12. Ultrasonic flowmeters. FUS-LDS Leak Detection System. Operating Instructions. August 2012. URL: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/989/23909989/att\\_99750/v1/FUS-LDS\\_manual\\_EN\\_A5E03687684-02.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/989/23909989/att_99750/v1/FUS-LDS_manual_EN_A5E03687684-02.pdf).

**МЕТОД КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСНОСТИ ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА**

*В статье предложен метод непрерывного контроля целостности линейной части магистральных газопроводов на основе данных мониторинга значений давления и температуры газа на входах и выходах всех узловых элементов, а также скорости потока газа на входе первого узлового элемента. Метод основан на алгоритме обработки данных мониторинга, который позволяет определить целостность всех элементов с использованием полученных ранее интегральных критериев. Реализация метода предусматривает создание системы мониторинга, которая содержит узловые пункты автоматического отбора данных, каналы передачи данных, базы данных оперативной информации.*

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, линейные и узловые элементы, мониторинг параметров потоков, контроль целостности.

**A METHOD FOR INTEGRITY INSPECTION OF LINEAR PART OF MAIN GAS PIPELINE WITH THE USE OF DATA OF THE FLOW PARAMETERS MONITORING**

*A method for continuous integrity inspection of linear part of main gas pipeline has been considered in the paper. Operation of the method is based on monitoring of pressure and temperature on the inflows and outflows of all nodal elements, such as block valve station, of the pipeline section between two compressor stations. The value of the gas velocity at the inflow of the first nodal element is to be also monitored for that. An algorithm for processing of the monitoring data and inspection on this basis, with the use of the previously obtained integral criteria, of the integrity of all technological objects of the section has been developed. To implement the method the monitoring system, containing nodal stations for automatic data collection, channels for data transmission and operational data bases should be created. The system can be integrated into the SCADA-system of automation of pipeline's linear part.*

**Key words:** main gas pipeline, linear and nodal elements, monitoring of flow parameters, integrity control.



**Відомості про авторів**

**Бабаків Р.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики і теорії систем управління Донецького національного університету імені Василя Стуса;

**Барановський Д.М.** – аспірант кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету;

**Батурін О.І.** – старший викладач кафедри програмування та математики Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля;

**Беглов К.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

**Борак К.В.** – кандидат технічних наук, заступник директора з навчальної роботи Житомирського агротехнічного коледжу;

**Вяткин С.І.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту автоматики та електрометрії СВ РАН;

**Газірієв Р.А.** – студент 4 курсу, спеціальності 123. Комп'ютерна інженерія інституту комп'ютерних систем Одеського національного політехнічного університету;

**Гомолінський В.О.** – асистент кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету;

**Гончарук А.В.** – магістрант кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету;

**Гумен Т.Ф.** – старший викладач кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Доценко Н.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»;

**Дурицький О.М.** – магістрант кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету;

**Єнчев С.В.** – кандидат технічних наук, доцент, заступник декана Аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету;

**Злепко С.М.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету;

**Іванов В.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмування та математики Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля;

**Ізонін І.В.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри інформаційних технологій видавничої справи Національного університету «Львівська політехніка»;

**Інь Ченлянь** – магістр з телекомунікацій, аспірант; Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Карпетян А.Р.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційних технологій проектування Черкаського державного технологічного університету;

**Кісельов Є.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри мікроелектронних інформаційних систем Інженерного інституту Запорізького національного університету;

**Клапоущак А.Ю.** – асистент кафедри загальної фізики Вінницького національного технічного університету;

**Коваль Л.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету;

**Ковальчук А.О.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри озброєння зенітних ракетних військ Харківського національного університету повітряних сил;

**Ковальчук Ю.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва;

**Козоровська К.А.** – студентка 4 курсу спеціальності 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, кафедра комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

**Коломоєць Г.П.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, директор Інженерного інституту Запорізького національного університету;

**Конюхов С.Л.** – старший викладач кафедри інформатики і кібернетики Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького;

**Коцун В.І.** – кандидат технічних наук, завідувач кафедри математики та комп'ютерних дисциплін Приватного вищого навчального закладу «Європейський університет»;

**Кравець Р.Б.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»;

**Крекотень Є.Г.** – магістрант Вінницького національного технічного університету;

**Криворучко І.О.** – аспірант кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету;

**Кривохата А.Г.** – асистент кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету;

**Кудін О.В.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету;

**Кузнєцов Ю.М.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання верстатів та машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Лазебний В.С.** – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Лайкова Л.Г.** – інженер кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Лисенко Е.С.** – студент Вінницького національного технічного університету;

**Лифар В.О.** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри програмування та математики Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля;

**Лифар О.К.** – старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля;

**Лісняк А.О.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету;

**Лобачов М.В.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри Одеського національного політехнічного університету;

**Ляхова О.В.** – спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Політехнічного коледжу Криворізького національного університету;

**Мельник О.Є.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту ДВНЗ «Криворізький національний університет»;

**Мещеряков Д.В.** – менеджер підтримки користувачів АТ PETROSOFT;

**Митрофанов О.В.** – аспірант кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету;

**Мірчук І.А.** – старший науковий співробітник ПрАТ «Український науково-дослідний інститут кабельної промисловості», аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

**Муждабаєв А.М.** – студент II курсу магістратури Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького;

**Недашківський Є.А.** – аспірант кафедри автоматизованих систем обробки інформації і управління Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Нечасв В.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування Криворізького національного університету;

**Новіцький Г.М.** – аспірант кафедри біомедичної інженерії Вінницького національного технічного університету;

**Овсієнко М.Ю.** – студент кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Оляднічук Р.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва;

**Осадча К.П.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інформатики і кібернетики Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького;

**Осадчий В.В.** – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри інформатики і кібернетики Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького;

**Павлов В.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Паламарчук В.Л.** – студент групи ІКН-17м факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії Вінницького національного технічного університету;

**Паламарчук М.І.** – магістр Вінницького національного технічного університету;

**Повхан І.Ф.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення систем ДВНЗ «Ужгородський національний університет»;

**Погромська Г.С.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики Миколаївського національного університету імені В.О. Сухомлинського;

**Політанський Р.Л.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

**Поліщук М.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної кібернетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Пономарьов Ю.В.** – кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи Науково-дослідного інституту транспортування газу АТ «Укртрансгаз»;

**Прудіус П.Г.** – кандидат медичних наук, головний лікар Вінницького клінічного ендокринологічного центру;

**Романюк О.Н.** – доктор технічних наук, професор кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету;

**Романюк О.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення Вінницького національного технічного університету;

**Рязанцев А.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування Криворізького національного університету;

**Савенко О.С.** – кандидат технічних наук, професор, декан факультету програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем Хмельницького національного університету;

**Савчук Т.О.** – PhD, професор, заступник завідувача кафедри комп'ютерних наук Вінницького національного технічного університету;

**Семенов А.О.** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету;

**Сердюк І.М.** – асистент кафедри інформатики і кібернетики Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького;

**Сєров Ю.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»;

**Сіпко О.М.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційних технологій проектування Черкаського державного технологічного університету;

**Скрипченко О.В.** – бакалавр, студент кафедри електронних пристроїв та систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Слободяник А.Д.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальної фізики Вінницького національного технічного університету;

**Таранець А.В.** – старший викладач кафедри електронних систем Інженерного інституту Запорізького національного університету;

**Тарасенко Я.В.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри інформаційних технологій проектування Черкаського державного технологічного університету;

**Терейковська Л.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики Київського національного університету будівництва і архітектури;

**Терейковський О.І.** – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Терещенко Т.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Тимофєєва А.Є.** – студентка 4-го курсу математичного факультету Запорізького національного університету;

**Титюк П.В.** – аспірант Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

**Тищенко О.С.** – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Трапезон К.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Трифонов А.І.** – аспірант кафедри менеджменту Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»;

**Федін І.С.** – студент кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

**Федушко С.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри соціальних комунікацій та інформаційної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»;

**Харитонов О.С.** – старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту ДВНЗ «Криворізький національний університет»;

**Химко О.М.** – кандидат технічних наук, доцент Національного університету «Львівська політехніка»;

**Чекурін В.Ф.** – доктор фізико-математичних наук, процесор Інституту прикладних проблем механіки і математики імені Я.С. Підстригача НАН України, завідувач відділу, професор Куявсько-Поморського університету в Бидгощі, Польща;

**Чорна В.О.** – кандидат технічних наук, викладач Кременчуцького льотного коледжу Національного авіаційного університету;

**Чорний В.В.** – магістрант кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету;

**Шевченко І.В.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційно-управляючих систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського;

**Шмельов Ю.М.** – кандидат технічних наук, викладач Кременчуцького льотного коледжу Національного авіаційного університету.

## **НОТАТКИ**

Науковий журнал

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

**Серія: Технічні науки**

**Том 30 (69) № 2 2019**

**Частина 1**

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Івана Кудрі, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

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

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 21,56. Ум.-друк. арк. 28,59. Зам. № 0519/112

Підписано до друку 31.05.2019. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

73021, м. Херсон, вул. Паровозна, 46-а, офіс 105

Телефон +38 (0552) 39 95 80

E-mail: [mailbox@helvetica.com.ua](mailto:mailbox@helvetica.com.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.